UNTERSUCHUNG DER SUBJEKTIVEN DETAILERKENNBARKEIT MIT HILFE DER FOURIERTRANSFORMATION UND ORTSFREQUENZFILTERUNG

Ulrich Greis

München
1968

UNTERSUCHUNG DER SUBJEKTIVEN DETAILERKENNBARKEIT MIT HILFE DER FOURIERTRANSFORMATION UND ORTSFREQUENZFILTERUNG

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von Ulrich Greis
aus München

München 1968

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Berichterstatter: 1. Wiss. Rat Dr. R. Röhler
2. Prof. Dr. Dr. H. Schober

Tag der mündlichen Prüfung: 26. 6. 1968

Fotodruck: Mikrokopie GmbH, 8 München 22, Bruderstraße 9

I N H A l T

Einleitung 1

1. Grundlegende Begriffe 4

1.1 Historisches 4
1.2 Die Übertragungstheorie in der Optik 6
1.3 Spektralfunktion und Wienerspektrum bei der inkohärenten optischen Abbildung 9
1.4 Ortsfrequenz- und Energiespektrum bei der Abbildung im kohärenten Licht 12
1.5 Qualität eines optischen Bildes 15
1.6 Optisches Rauschen 19

2. Frühere Untersuchungen 22

2.1 Anwendung der Übertragungstheorie auf den menschlichen Gesichtssinn 22
2.2 Untersuchungen zur Bildqualität 23
2.3 Fourieranalyse photographischer Bilder 25

3. Untersuchungsmethode 29

3.1 Objektive Messungen 29
3.11 Fraunhofersche Beugung 29
3.12 Ausmessung der Spektren 38
3.13 Frequenzfilterung 42
3.14 Fehlerquellen und Auflösungsvermögen 59
3.2 Anwendung der Ortsfrequenzfilterung auf Fragen der subjektiven Detailerkennbarkeit 61
3.21 Prinzip der Untersuchungen 61
3.22 Versuchsdurchführung 62

4. Experimentelle Ergebnisse und Auswertung 66

4.1 Einfluß des photographischen Prozesses 66
4.2 Bedeutung der Nullfrequenz 68
4.3 Tiefpaßgefilterte Bilder 69
4.4 Durch Bandsperren erzeugte Bilder 74
4.5 Erkennbarkeit eines Testzeichens in einer Störstruktur 77

Zusammenfassung 82

Literaturverzeichnis 83

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545804_0090

Einleitung

Die Erkennbarkeit von Einzelheiten an optischen Strukturen durch den menschlichen Beobachter, mit der sich die vorliegende Arbeit beschäftigt, wird mit den Methoden der physiologischen Optik schon seit Jahrzehnten untersucht. Diese klassischen Messungen behandeln fast ausschließlich den Fall eines einfachen Testzeichens, das in einem homogenen, gleichförmig beleuchteten Umfeld dargeboten wird. Entsprechend der Vielzahl der Parameter, die dabei eine Rolle spielen, wie Adaptionszustand, Leuchtdichte, Form und Größe von In- und Umfeld, Darbietungszeit usw. hat sich ein umfangreiches Tatsachenmaterial angesammelt. Die Erkenntnisse, die daraus gewonnen werden konnten, lassen sich jedoch im allgemeinen nicht auf die praktischen Anforderungen an den Gesichtssinn beziehen, die meist in einer Verarbeitung weit komplizierterer optischer Eindrücke bestehen.

Bei der Auswertung eines optischen Bildes muß man sich zunächst die Frage stellen: "Was möchte ich sehen?" Unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, wird in der Optik fast immer ein großer Teil der Informationskapazität verschwendet; außer den wichtigen Details werden zwangsläufig viele Strukturen abgebildet, die für den bestimmten Zweck gar nicht interessieren. Der Informationsgehalt einer Zeichnung ist zweifellos geringer als der einer konturenscharfen photographischen Aufnahme. Trotzdem genügt die Zeichnung in vielen Fällen vollauf, ja sie kann sogar der Photographie überlegen sein, weil der Betrachter nicht durch unwichtige, störende Strukturen beeinflußt wird.

In den letzten Jahren wandte sich daher das Interesse hauptsächlich dem Einfluß zu, den heterogene, beliebig strukturierte Umfelder auf die Erkennbarkeit bestimmter Formen ausüben. Diese Fragestellung entspricht in stärkerem Maße als die klassische den praktischen Erfordernissen, bei denen es in der Regel darauf ankommt, bestimmte informationswichtige Details in einer Fülle störender Strukturen zu erkennen. Als spezielle Beispiele seien

hier die subjektive Auswertung photographischer Aufnahmen, z.B. Röntgen- oder Luftbilder und die Erkennbarkeit von Objekten am Radarschirm genannt.

Neben den bereits bei den klassischen Messungen erwähnten Parametern tritt in all diesen Fällen noch eine Abhängigkeit der Detailerkennbarkeit von der jeweils vorliegenden Bildstruktur auf, so daß praktisch für jede Untersuchung das gesuchte Detail und sein Umfeld explizit angegeben werden müssen. Durch die Vielzahl möglicher Objektstrukturen wachsen die Variationsmöglichkeiten beinahe ins Unermeßliche, so daß sich die einzelnen Erscheinungen bei der subjektiven Auswertung optischer Vorlagen gar nicht mehr überblicken lassen. Als Ausweg aus dieser Situation bieten sich die Methoden der optischen Übertragungs- und Informationstheorie an. In der vorliegenden Arbeit wird die Möglichkeit aufgezeigt, wie mit ihrer Hilfe Einzelbeobachtungen an komplizierten Strukturen sinnvoll geordnet und durch ein allgemeines Schema beschrieben werden können.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Der erste enthält die grundlegenden Begriffe und frühere Ergebnisse (Kap. 1 und 2). Die Methoden der Übertragungstheorie werden dabei nur soweit beschrieben, als es zum Verständnis der folgenden Kapitel nötig ist. Im einzelnen wird auf das Literaturverzeichnis verwiesen. Ein weiterer Abschnitt behandelt die Beschreibung der Abbildungseigenschaften des Auges durch subjektive und objektive Übertragungsfunktionen. Ihnen werden die Begriffe "Ortsfrequenzspektrum" und "Signal-Rauschverhältnis" gegenübergestellt, die dem Problem der Erkennbarkeit an komplizierten Strukturen besonders angepaßt sind. Bisherige experimentelle Ergebnisse sind im Abschnitt "Fourieranalyse photographischer Bilder" enthalten.

Im zweiten Teil (Kap. 3 und 4) werden Untersuchungsmethode und Ergebnisse beschrieben. Die Messungen betreffen zwei Abschnitte,

einen objektiven, physikalischen Teil und subjektive Testreihen. Zunächst wird das Verfahren, mit dessen Hilfe Ortsfrequenzspektren gemessen und in definierter Weise verändert wurden, angegeben. Daran schließt sich die Beschreibung der subjektiven Auswertung der Testvorlagen durch Versuchspersonen an. Zuletzt werden die erhaltenen Ergebnisse und die Korrelationen zwischen objektiven und subjektiven Kriterien diskutiert.

1. Grundlegende Begriffe

1.1 Historisches

Im Jahre 1887 veröffentlichte E.v.ABBE seine Untersuchungen über die Bildentstehung im Mikroskop. Er zerlegte nach einem schon von Airy 1834 angegebenen Verfahren das Objekt in einzelne Punkte, betrachtete deren jeweilige Abbildung und setzte die Bilder dieser Objektelemente (Beugungsscheibchen) wieder zum Gesamtbild zusammen. Nach dem gleichen Prinzip geht die heute vielfach verwendete Methode vor, ein abbildendes System durch die Art und Weise zu kennzeichnen, wie eine punktförmige Intensitätsverteilung abgebildet wird (Punktbild).

Der eigentliche Anstoß zur Übertragungstheorie und dem sie umfassenden Schema der Informationstheorie kam jedoch aus dem Bereich der elektrischen Nachrichtenübertragung durch die Arbeiten von KÜPFMÜLLER und NYQUIST 1924. Alle wesentlichen Elemente der Informationstheorie im heutigen Sinne wurden 1928 von HARTLEY angegeben. 1946 wendete DUFFIEUX die Übertragungstheorie auf die inkohärente optische Abbildung an. Die Charakterisierung eines abbildenden Systems erfolgt durch die Modulationsübertragungsfunktion (MÜF) bzw. durch das Punktbild, die sich beide ineinander umrechnen lassen. Das Analogon dazu ist in der Elektronik der "Frequenzgang" eines linear arbeitenden Gerätes.

Die bereits genannten Arbeiten ABBE's zur Bildentstehung im Mikroskop erwiesen sich allerdings auch noch in ganz anderer Hinsicht als nutzbringend für die Übertragungstheorie. Durch Beeinflussung des "primären Interferenzbildes" im Mikroskop bei Beleuchtung mit kohärentem Licht gelang es, die Bildstruktur in charakteristischer Weise zu verändern. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit

einer optischen Filterung, die der elektronischen Frequenzfilterung analog ist. Die Grundlage bilden die Gesetze der Lichtbeugung von Huygens, Fresnel und Fraunhofer. Es besteht dabei der glückliche Umstand, daß in der Fraunhoferschen Anordnung die Vorgänge der Lichtbeugung durch eine Fouriertransformation beschrieben werden können, einem mathematischen Formalismus, der, wie in Kap. 1.2 gezeigt wird, in der Übertragungstheorie eine wesentliche Rolle spielt. Die zweidimensionalen Fouriertransformationen aus der optischen Übertragungstheorie lassen sich deshalb beugungsoptisch durchführen. Dieses Prinzip wurde vor allem von MARECHAL und seinen Mitarbeitern 1953 zur Methode der Ortsfrequenzfilterung weiterentwickelt, die in Kap. 3.13 näher beschrieben wird.

1.2 Die Übertragungstheorie in der Optik

In der vorliegenden Arbeit wird die Erkennbarkeit von optischen Strukturelementen bzw. Strukturänderungen untersucht, die nicht nur ein einzelnes, an einem bestimmten Punkt im Bild lokalisiertes Detail sondern das gesamte Testbild betreffen. Würde man sich nur für einen ganz bestimmten Bildort interessieren, so wäre es zweckmäßig, als physikalisches Maß die örtliche Leuchtdichteverteilung $g(x,y)$ der Vorlage zu verwenden. Stellt man jedoch wie in dieser Arbeit Vergleiche zwischen photographischen Aufnahmen an, die das selbe Motiv mit unterschiedlicher Qualität wiedergeben, so erstrecken sich die Strukturunterschiede auf alle Bereiche des Bildes. Um es mit physikalischen Mitteln quantitativ erfassen zu können, bedient man sich dann besser der Darstellung im Frequenzraum, wie es in der Übertragungstheorie üblich ist.

Bildet man eine Leuchtdichteverteilung $g(x,y)$ ab, so erhält man ein Bild $b(x',y')$. Jeder Punkt $P'(x',y')$ läßt sich als Überlagerung der Zerstreuungsfiguren aller Punkte P von $g(x,y)$ darstellen. Man erhält:

$$b(x',y') = \int_{-\infty}^{+\infty}\int g(x,y)d(x'-x,y'-y)dxdy \qquad /1/$$

Durch Fouriertransformation ergibt sich daraus die Beziehung:

$$B(u,v) = G(u,v,)\cdot D(u,v) \qquad /2/$$

Die Großbuchstaben B,G und D bezeichnen die Fouriertransformierten der mit den gleichen Kleinbuchstaben angegebenen Funktionen. So ist beispielsweise

$$D(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int d(x,y)\ \exp\left\{-2\pi i(ux+vy)\right\} dxdy. \qquad /3/$$

D(u,v), die Fouriertransformierte des Punktbildes d(x,y), nennt man Modulationsübertragungsfunktion (MÜF). Die Eigenschaften eines abbildenden Systems können sowohl durch d(x,y) wie auch durch D(u,v) beschrieben werden. Die Spektralfunktionen B(u,v) und G(u,v) repräsentieren Bild- und Objektstruktur.

Die Anwendbarkeit der MÜF ist allerdings an verschiedene Voraussetzungen geknüpft. Die Punktbilder, die zur Entstehung des Gesamtbildes beitragen, müssen sich unabhängig voneinander überlagern (Linearität). Außerdem darf die Gestalt des Punktbildes d innerhalb des betrachteten Bereiches nicht vom Ort abhängen (Isoplanasie). Da ferner alle physikalisch realisierbaren Funktionen b, g, d quadratisch integrabel sind, d.h. einen endlichen "Energieinhalt" besitzen, ist auch die Existenz ihrer jeweiligen Fouriertransformierten gesichert.

Die Messung der MÜF erfolgt in der Regel durch Abbildung von cos-förmigen Rastern bekannten Kontrastes, die bei linearer Abbildung wieder in cos-förmige Gitter mit gleicher Gitterkonstanten übergehen.

Die MÜF gestattet eine pauschale Beurteilung eines abbildenden Systems, ohne daß auf die einzelnen Parameter, welche die Abbildung kennzeichnen - z.B. die umständlich zu berechnenden Linsenfehler von Objektiven - eingegangen werden muß.

Im Falle der inkohärenten optischen Abbildung sind die Funktionen b(x',y') und g(x,y) Leuchtdichteverteilungen. Bei der Beschreibung der Abbildung im kohärenten Licht sind an ihre Stelle die Amplituden des

elektrischen Feldvektors der Lichtwellen r(x',y') und f(x,y) zu setzen. Im Frequenzraum ergibt sich dann in gleicher Weise wie bei den Gleichungen /1/ und /2/ die Beziehung:

$$R(u,v) = F(u,v) \cdot K(u,v) \qquad /4/$$

R und F nennt man Ortsfrequenzspektren. Sie sind die Fouriertransformierten der Amplitudenverteilungen r und f. K(u,v), die Übertragungsfunktion, beschreibt die Qualität der Abbildung, sofern wiederum die Bedingungen der Linearität und Isoplanasie erfüllt sind.

1.3 Spektralfunktion und Wienerspektrum bei der inkohärenten optischen Abbildung

In ähnlicher Weise wie die MÜF D(u,v) die Qualität der Abbildung pauschal wiedergibt, bieten die Spektralfunktionen B und G einen Ansatzpunkt, die Struktur optischer Bilder zu beschreiben, ohne daß es nötig ist, die darin enthaltenen einzelnen Details explizit zu nennen.

Rein physikalisch betrachtet stellt ein Testbild eine zweidimensionale Helligkeitsverteilung g(x,y) dar. Diese Funktion kann durch punktweises Photometrieren gemessen werden. Das gleiche Bild wird aber auch durch das Spektrum G(u,v) vollständig beschrieben.
Dabei ist

$$G(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int g(x,y)\, \exp\left\{-2\pi i(ux+vy)\right\} dxdy \qquad /5/$$

Die komplexe Funktion G(u,v) kann dargestellt werden als

$$G(u,v) = \left|G(u,v)\right| e^{i\varphi(u,v)} \qquad /6/$$

Für viele Zwecke genügt es, nur den Betrag $|G(u,v)|$ zu kennen, während der spektrale Phasenwinkel $\varphi(u,v)$ nicht interessiert. Die ein-eindeutige Beziehung $g(x,y) \longleftrightarrow G(u,v)$ geht damit allerdings verloren. Es gilt nur noch $g(x,y) \longrightarrow |G(u,v)|$. Diese Beschränkung ist z.B. gerechtfertigt, wenn es sich um den Vergleich verschiedener Testbilder mit konstantem $\varphi(u,v)$ handelt.

Die Spektralfunktion G(u,v) ist definiert für positive und negative Frequenzen. Aus Symmetriegründen läßt sich jedoch der eine Teil aus dem anderen berech-

nen, wie man durch Umkehrung der Vorzeichen von u und v in den Gl. /5/ und /6/ zeigen kann.

Auch bei Beschränkung auf Betrag und positive Frequenzen bleibt eine zweidimensionale reele Funktion $|G(u,v)|$ übrig, die nur mit großem Aufwand gemessen werden kann und zu kompliziert ist, als daß sie als allgemeines Kriterium verwendet werden könnte.

Um zu einer einfacheren Größe für die Bildstruktur zu gelangen, die trotzdem noch die wesentlichen Merkmale der Vorlage wiedergibt, bedient man sich verschiedener Wege. Meist nimmt man eine geeignete Mittelung über eine Koordinate vor, so daß eine eindimensionale Funktion übrigbleibt. Derartige Versuche werden in Kap. 2.3 näher beschrieben. Eine andere Möglichkeit bietet das integrierte Wienerspektrum der Signalfunktion. Als Wienerspektrum bezeichnet man das reelle Produkt $G(u,v)G^*(u,v) = |G(u,v)|^2$. Da $g(x,y)$ eine Leuchtdichteverteilung darstellt, hat $|G(u,v)|^2$ die Dimension einer (Energiedichte)^2. Aus physikalischen Gründen hat die Signalfunktion $g^2(x,y)$ einen endlichen Inhalt, d.h.

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty}\int g^2(x,y)\,dx\,dy \qquad /7/$$

ist endlich. Dieser Wert kann auch aus der Spektralfunktion erhalten werden (Theorem von Plancherel):

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty}\int |G(u,v)|^2\,du\,dv. \qquad /8/$$

Erstreckt man die Integration nur über bestimmte, endliche Frequenzgebiete (u,v), so können die Differenzen von W in den verschiedenen spektralen Bereichen, wie in Kap. 2.3 gezeigt wird, als Maß für den subjektiv empfundenen Strukturunterschied zweier

motivgleicher Testbilder dienen.

Von der Signalfunktion g(x,y) kann man außer über das Spektrum G(u,v) auch über die Autokorrelationsfunktion $\phi(\xi,\eta)$ zum Wienerspektrum gelangen. Beide Verfahren sind durch photometrische Abtastung der Vorlage und anschließende elektronische Weiterverarbeitung der erhaltenen Werte technisch durchführbar.

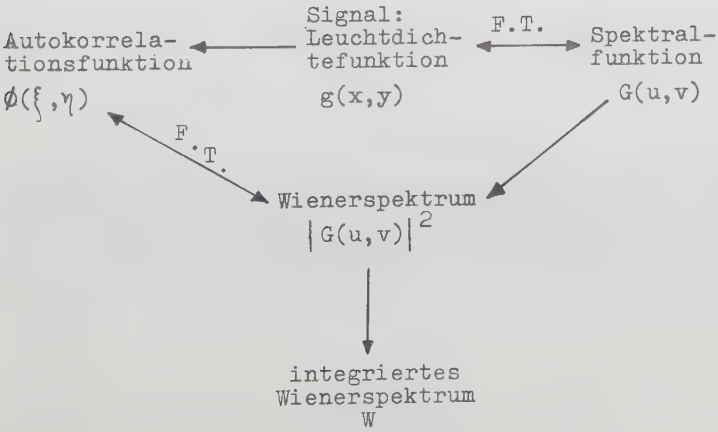
Die Autokorrelationsfunktion ist definiert als

$$\phi(\xi,\eta) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int g(x,y)g(\xi-x,\eta-y)dxdy \qquad /9/$$

Den Zusammenhang mit dem Wienerspektrum liefert das Theorem von Wiener-Khinchin, wonach das Wienerspektrum der Funktion g(x,y) der Fouriertransformierten der Autokorrelationsfunktion gleich ist.

$$|G(u,v)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty}\int \phi(\xi,\eta)\ \exp\{-2\pi i(u\xi+v\eta)\}\,d\xi\,d\eta \qquad /10/$$

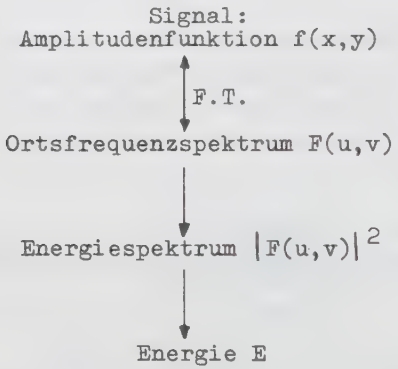
Der Übersichtlichkeit halber seien die Zusammenhänge noch einmal in einem Schema zusammengefaßt, wobei aus physikalischen Gründen vorausgesetzt wird, daß die mit F.T. bezeichneten jeweiligen Fouriertransformationen möglich sind.



1.4 Ortsfrequenz- und Energiespektrum bei der Abbildung im kohärenten Licht

Bei der Abbildung im kohärenten Licht wird die Objektstruktur entweder durch die komplexe Amplitudenfunktion $f(x,y)$ oder durch ihr Ortsfrequenzspektrum $F(u,v)$, s.Gl./4/, beschrieben. Im Gegensatz zur inkohärenten Abbildung sind diese Funktionen selbst nicht meßbar. Nur die Energiegrößen $|f(x,y)|^2$ bzw. $|F(u,v)|^2$ sind einer Messung unmittelbar zugänglich. $|F(u,v)|^2$ steht dabei in Analogie zum bereits erwähnten Wienerspektrum $|G(u,v)|^2$, hat aber im Gegensatz zu diesem die Dimension einer Energie und wird Energiespektrum genannt. Durch Integration über alle Frequenzen u,v erhält man die (endliche) Gesamtenergie.

Die Zusammenhänge lassen sich in folgendem Schema darstellen (F.T. bedeutet wiederum Fouriertransformation):



In Kap. 4 wird gezeigt, daß die in bestimmten Spektralbereichen enthaltene Energie als Maß für subjektiv empfundene Strukturmerkmale dienen kann.

Zwischen dem Energiespektrum und der im vorigen Kapitel eingeführten Spektralfunktion G(u,v) läßt sich auf folgende Weise ein Zusammenhang herstellen:

G(u,v) war definiert als die Fouriertransformierte der Leuchtdichte- oder Transparenzfunktion (bei Diapositiven) g(x,y):

$$G(u,v) = F.T.\{g(x,y)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x,y)\, \exp\{-2\pi i(ux+vy)\}\, dxdy \qquad /11/$$

es ist aber: $g(x,y) = |f(x,y)|^2$ /12/

daraus folgt: $G(u,v) = F.T.\{|f(x,y)|^2\}$ /13/

es ist: $F.T.\{f(x,y)\} = F(u,v)$

Bildet man die Autokorrelationsfunktion

$$\phi(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(w,z)F(u-w,v-z)dwdz \qquad /14/$$

dann erhält man durch Fouriertransformation aus dem Faltungsintegral /14/ ein Produkt:

$$F.T.\{\phi(u,v)\} = |f(x,y)|^2 \qquad /15/$$

Aus /13/ und /14/ folgt:

$$G(u,v) = F.T.\{F.T.[\phi(u,v)]\} = \phi(-u,-v)$$

$$G(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(w,z)F(-u-w,-v-z)dwdz \qquad \text{oder}$$

$$G(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} F^*(w,z)F^*(u-w,v-z)dwdz \qquad /16/$$

Die Spektralfunktion bezüglich der Leuchtdichte G(u,v) ergibt sich also als eine Autokorrelationsfunktion /16/ des Ortsfrequenzspektrums $F^*(u,v)$ der Amplitudenfunktion f(x,y).

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Testbilder waren Schwarz-Weiß-Diapositive. Ihre Struktur wird sowohl durch $G(u,v)$ als auch durch $F(u,v)$ repräsentiert. Der durch Gl. /16/ gegebene komplizierte Zusammenhang vereinfacht sich allerdings wesentlich, wenn die Transparenz des Diapositivs nur die Werte 0 oder 1 annimmt. Dies ist etwa der Fall bei Lochblenden, Streifengittern mit undurchlässigen Balken und freien Zwischenräumen oder ähnlichen Vorlagen. Da die Leuchtdichtefunktion $g(x,y)$ und der Betrag der Amplitudenfunktion $|f(x,y)|$ dann jeweils nur gleiche Werteo oder 1 annehmen, haben Energiespektrum $|F(u,v)|^2$ und Wienerspektrum $|G(u,v)|^2$ formal gleiche Gestalt. Man kann setzen:

$$|G(u,v)|^2 = C|F(u,v)|^2, \qquad /17/$$

wobei für die Proportionalitätskonstante C noch die Dimension einer Energie anzusetzen ist.

Die Bedingung /17/ ist für Halbtonvorlagen nicht mehr erfüllt. Nur für sehr hart kopierte photographische Vorlagen nähert man sich, wie in den Kap. 3 und 4 gezeigt wird, dem durch Gl. /17/ beschriebenen Fall an.

1.5 Qualität eines optischen Bildes

Maximaler Strukturgehalt

Außer den spektralen Energiewerten kann rein physikalisch gesehen auch noch ein anderes Kriterium zur Beschreibung optischer Strukturen herangezogen werden, das maximaler Strukturgehalt genannt wird.

Die in dieser Arbeit verwendeten Testbilder waren Diapositive, die durch ihre Transparenz eine Modulation der einfallenden Lichtamplitude nach der Funktion $f(x,y)$ bewirken. $f(x,y)$ nimmt innerhalb eines vorgegebenen Formates (24 x 24 mm) bestimmte Werte an und ist außerhalb desselben gleich 0. Bei einer derart hart ein- und aussetzenden Signalfunktion $f(x,y)$ treten oberhalb jeder beliebigen Frequenzschranke noch Spektralkomponenten auf. Für keine der Koordinaten läßt sich in diesem Falle eine Bandbreite U,V angeben, welche der strengen Forderung $F(u,v) \equiv 0$ für $u > U$ und $v > V$ genügt. Man kann jedoch effektive Bandbreiten U_e, V_e angeben, wenn man fordert, daß die (endliche) spektrale Energie nur bis zu einer Genauigkeit ε bestimmt werden muß, so daß die gemessene Energie E_1 die Bedingung $E_1 = (1-\varepsilon)E$ erfüllt. Für ein vorgegebenes ε existieren dann Schranken U_e, V_e, so daß für außerhalb liegende Werte von u und v $F(u,v)$ keinen meßbaren Beitrag mehr zur Energiefunktion liefert.

Beschränkt man andererseits das Spektrum auf einen endlichen Bereich, so durchbricht bei der Rücktransformation die Signalfunktion ihre Begrenzung. In gleicher Weise wie oben läßt sich dann eine effektive Signalausdehnung X_e, Y_e angeben. Außerhalb dieses Bereiches sind die Signalamplituden so gering, daß sie in Anbetracht der Fehlergrenze ε keine meßbaren Beiträge mehr zur Energie leisten.

Das Produkt $MS = U_e V_e X_e Y_e$ /18/

wird maximaler Strukturgehalt genannt. Es reduziert sich bei eindimensionalen Strukturen auf $MS = U_e X_e$.

Der maximale Strukturgehalt MS erweist sich als invariant gegen lineare Transformationen und bezeichnet die im Signal potentiell enthaltene Information. Er steht in engem Zusammehang mit der Zahl der zur Beschreibung der Funktion f(x,y) notwendigen und hinreichenden Daten. Diese Zahl läßt sich bei Signalen von streng endlicher Bandbreite U,V ($-U \leq u \leq +U$, $-V \leq v \leq +V$) exakt angeben, d.h. bei Signalen, die nicht auf ein endliches Format beschränkt sein dürfen. Jede derartige Funktion f(xy) kann durch eine Folge von Auswahlwerten (sampling values) in den Abständen $x_o = 1/2U$ bzw. $y_o = 1/2V$ vollständig bestimmt werden (sampling theorem). Auf einen Abschnitt des Formates X,Y entfallen $xy/x_o y_o = 2^2UVXY = 2^2MS$ Auswahlwerte. Der maximale Strukturgehalt liefert nur Aussagen über ihre Zahl, d.h. über die im Bild f(x,y) potentiell vorhandene Information, die aber nicht notwendigerweise in jedem Falle enthalten sein muß.

Besser als der maximale Strukturgehalt sind zur Beschreibung der Qualität eines optischen Bildes die drei nachfolgenden, von LINFOOT angegebenen Kriterien geeignet. Die Funktionen $f_1(x,y)$ und $f_2(x,y)$ mit ihren Spektren $F_1(u,v)$ bzw. $F_2(u,v)$ beschreiben dabei entweder Objekt und Bild bei einer linearen optischen Abbildung oder zwei motivgleiche Bilder unterschiedlicher Qualität.

Relativer Strukturgehalt

Der relative Strukturgehalt RS ist definiert als

$$RS = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int f_2^2(x,y)dxdy}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int f_1^2(x,y)dxdy} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int |F_2(u,v)|^2 dudv}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int |F_1(u,v)|^2 dudv} \qquad /19/$$

Der relative Strukturgehalt gibt also das Verhältnis der Energiebeträge der beiden zu vergleichenden Bildstrukturen $f_1(x,y)$ und $f_2(x,y)$ an.

Korrelationsqualität

Die Korrelationsqualität KQ erhält man durch

$$KQ = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int f_1(x,y)f_2(x,y)dxdy}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int f_1^2(x,y)dxdy} \qquad /20/$$

Die Korrelationsqualitat wird zweckmäßigerweise dann als Kriterium verwendet, wenn die Unterschiede von f_1 und f_2 in erster Linie durch räumliche Phasenverschiebungen bedingt sind.

Fidelität

Die Fidelität FI ist gegeben durch

$$FI = 1 - \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int \left[f_1(x,y)-f_2(x,y)\right]^2 dxdy}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int f_1^2(x,y)dxdy} =$$

$$= 1 - \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int |F_1(u,v)-F_2(u,v)|^2 dudv}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int |F_1(u,v)|^2 dudv} \qquad /21/$$

Der in diesem Kriterium enthaltene Term $\int_{-\infty}^{+\infty}\int |(F_1-F_2)|^2 dudv / \int_{-\infty}^{+\infty}\int |F_1|^2 dudv$ gibt die relative

Energiedifferenz der beiden motivgleichen Strukturen f_1 und f_2 wieder. Er zeigt, wie aus den Kap. 4.3 und 4.4 hervorgeht, bei bestimmten Fragestellungen eine strenge Korrelation mit der subjektiven Detailerkennbarkeit.

1.6 Optisches Rauschen

Der in der Formel /1/ zum Ausdruck kommende eindeutige Zusammenhang zwischen Objektverteilung g(x,y) und Bildverteilung b(x',y') gilt nur, solange die Erscheinung des optischen Rauschens vernachlässigt werden kann. In der Regel tritt aber zur idealen ungestörten Bildstruktur b(x',y') noch eine unvorhersehbare Schwankung, entweder als Kanal- oder als Empfängerrauschen hinzu. Beide lassen sich durch eine statistische Funktion n(x',y') darstellen: Kanalrauschen umfaßt beispielsweise Streulicht, falsche Reflexionen und Quantenrauschen. Das Empfängerrauschen beinhaltet die Struktur des Empfängers, etwa die Filmkörnigkeit. Man erhält die Beziehung

$$g(x,y) \longrightarrow b(x',y') + n(x',y') \qquad /22/$$

Für die Funktion n(x',y') sind zwei Parameter kennzeichnend:

1. Die Amplitudenverteilung d.h. die Häufigkeitserscheinung der Funktionswerte und ihre Schwankung.
2. Die Korrelation zwischen Werten von n an verschiedenen Orten, welche die spektrale Frequenzverteilung bestimmt.

Will man von den Formatgrenzen absehen, so ist als Autokorrelationsfunktion zu setzen

$$\Psi(\xi,\eta) = \lim_{F\to\infty} \frac{1}{F} \iint_F n(x,y)n(\xi-x,\eta-y)dxdy \qquad /23/$$

In der Praxis muß das Integrationsgebiet F möglichst groß gewählt werden, aber so, daß folgende Bedingungen erfüllt sind.

1. Für $(x,y)\in F$ muß auch stets $(\xi-x,\eta-y)\in F$ sein.
2. Innerhalb von F muß n(x,y) stationär sein.

Bei statistischen Funktionen geht für große Verschiebungen ξ,η $\Psi(\xi,\eta) \longrightarrow 0$. Die Fouriertransformierte von $\Psi(\xi,\eta)$ wird wieder Wienerspektrum genannt.

Sofern das Wienerspektrum über einen größeren als den sinnesmäßig wahrnehmbaren Bereich konstant bleibt, spricht man von weißem Rauschen. Aus physikalischen Gründen sind völlig unkorrelierte Funktionswerte nicht realisierbar; d.h. das Spektrum ist in jedem Falle begrenzt und besitzt einen endlichen Inhalt.

In relativ einfacher Form tritt optisches Rauschen in photographischen Aufnahmen auf, wo es sich als Körnigkeit des Bildes äußert. Im Bildverstärker überlagert sich dem Signal dagegen ein zeitlich veränderliches Rauschen. In beiden Fällen handelt es sich aber um statistische örtliche (und zeitliche) Helligkeitsschwankungen, über die ein Beobachter integrieren muß.

Störend für die subjektive Erkennbarkeit von optischen Signalen sind jedoch nicht nur diese statistischen Erscheinungen, die unter dem Begriff "Rauschen" im engeren Sinne verstanden werden, sondern auch mehr oder minder geordnete Strukturen, die in der Regel unvermeidlich zusammen mit der Signalstruktur übertragen werden, aber für den bestimmten Zweck nicht interessieren. Die Methoden zur Erfassung des optischen Rauschens müssen deshalb auf die Beschreibung allgemeiner Züge von nichtstatistischen Strukturen verallgemeinert werden.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb nur die Begriffe Signal- und Störstruktur verwendet, wobei letztere sowohl geordnete als auch statistische Elemente enthalten kann.

Der Ausgangspunkt für ein gemeinsames Schema ist in dieser Arbeit die Energie, die in gewissen spektralen Bereichen des Signals und der Störstruktur enthalten ist. Objektiv wird die Erkennbarkeit einer Signalstruktur durch das "Signal-Rausch-Verhältnis" E/N bestimmt. Darin bezeichnen E den Energieinhalt des Signals im Sinne des Kap. 1.3 und N denjenigen der Störstruktur in der Umgebung des Signals. Wenn der Quotient E/N auch die subjektive Erkennbarkeit bestimmt, so muß durch Einengung der spektralen Bandbreite der Störstruktur und damit durch Verringerung der Störenergie, die zum Erkennen notwendige Schwellenenergie E_o eines Signals verringert werden können, sofern es nur ein schmales Frequenzband umfaßt. In analoger Weise verfährt man bekanntlich in der Elektronik. Die Bandbreite eines Verstärkers wird beispielsweise so groß bemessen, daß das Signal vollständig übertragen wird. Eine Vergrößerung der Bandbreite hätte nur den Nachteil, daß das Rauschen verstärkt würde. Ein Gewinn an Signalenergie könnte dadurch nicht erzielt werden. Das Ergebnis eines solchen optischen Versuches wird in Kap. 4,5 diskutiert.

2. Frühere Untersuchungen

2.1 Anwendung der Übertragungstheorie auf den menschlichen Gesichtssinn

Die Abhängigkeit des Schwellenkontrastes von der Detailgröße im Falle einfacher Testzeichen auf homogenem Umfeld wurde in zahlreichen Arbeiten untersucht. Die Ergebnisse von BLACKWELL und VOS/LAZET/BOUMAN an kreisförmigen Figuren, sowie die Messungen von LOWRY/DEPALMA, BRYNGDAHL und SCHOBER/HILZ an Streifengittern lassen sich in wesentlichen Bereichen durch die Modulationsübertragungsfunktionen bzw. die Punkt- oder Spaltbilder erklären, die von FLAMANT, RÖHLER, KRAUSKOPF und ARNULF auf direktem Wege bestimmt werden konnten. Eine gewisse Diskrepanz besteht allerdings von vorneherein darin, daß die MÜF und das Punktbild sich auf Aussagen über die geometrisch-optischen Verhältnisse bei der Abbildung beschränken, während bei den erstgenannten Untersuchungen auch nervöse Vorgänge wie Hemmungsprozesse und psychologische Effekte eine Rolle spielen. Trotz dieser Einschränkung zeigt das zahlreich vorhandene Untersuchungsmaterial, daß sich zumindest im Schwellenbereich die Methoden der optischen Übertragungstheorie auf die Abbildung durch das Auge anwenden lassen.

2.2 Untersuchungen zur Bildqualität

Die Untersuchungen an komplizierteren optischen Strukturen zeigen eine Vielfalt komplexer Erscheinungen. Um wenigstens für einen Teil von ihnen eine allgemeine Beschreibung geben zu können, wurden verschiedene Versuche unternommen.

HIGGINS/JONES sowie WOLFE/EISEN konnten nachweisen, daß bei der Beurteilung photographischer Aufnahmen die objektiv meßbare Kantenschärfe in enger Korrelation zum subjektiven Schärfeeindruck steht. HIGGINS/WOLFE zeigten daraufhin, daß bei den von ihnen untersuchten Aufnahmen in erster Linie die Schärfe und erst danach Auflösungsvermögen, Körnigkeit und Gradation für die Bildgüte maßgebend waren.

Daß Bildgüte und Detailerkennbarkeit keineswegs immer korrelieren, wiesen STULTZ/ZWEIG nach. Während die einzelnen Beobachter von Bildgüte sehr unterschiedliche Vorstellungen hatten, war der Begriff "Detailerkennbarkeit" bei fast allen Testpersonen mit dem Schärfeeindruck verbunden, ohne daß diese Begriffe vorher näher definiert worden waren.

Den Versuch, ein Bildgütemaß auf der Grundlage der Übertragungstheorie zu finden, unternahmen vor allem LINFOOT, FRANKE, HEYNACHER, KROEBEL, ROSENBRUCH und FRIESER/BIEDERMANN. Es zeigte sich jedoch, daß die MÜF für die Bildgüte nur ein Parameter unter vielen ist, und daß die Aufstellung eines allgemeinen Kriteriums den Rahmen der Übertragungstheorie sprengt. Die Hauptschwierigkeit bei der Befragung von Versuchspersonen liegt darin, daß die Art der Testobjekte und die Form der Fragestellung eine ganz wesentliche Rolle spielen.

Aus den genannten Arbeiten geht hervor, daß es zweckmäßig ist, die Begriffe "Detailerkennbarkeit" und "Bildgüte" streng voneinander zu trennen.

In vielen praktischen Fällen ist es nur wichtig, bestimmte Details möglichst gut zu erkennen. Die Qualität des Bildes im weiteren Sinne spielt dabei keine Rolle. So können z.B. im Mikroskop durch Eingriffe im primären Interferenzbild bestimmte Strukturen besonders deutlich sichtbar gemacht werden, während die Abbildung anderer Details verschlechtert wird. Entscheidend ist allein die Frage, was man sehen will.

Die Detailerkennbarkeit ist ein auf die Eigenschaften des Empfängers bezogenes Kriterium, während die Bildgüte weitgehend psychologische Merkmale enthält, die sich in strenger Form gar nicht zusammenfassend darstellen lassen. Die Detailerkennbarkeit spielt daher dort eine wesentliche Rolle, wo aus notwendigerweise schlechten Bildern Information entnommen werden soll, während die Bildgüte in der Praxis ausschließlich ein Kriterium für bereits brauchbare, relativ gute Bilder darstellt und deshalb von vorwiegend psychologischen Momenten bestimmt wird. Die Detailerkennbarkeit stellt einen etwas enger begrenzten, dafür aber auch besser definierten Begriff dar, der außerdem den Vorteil hat, daß er sich mit den Methoden der Übertragungstheorie erfassen läßt.

2.3 Fourieranalyse photographischer Bilder

Die Messung von Fourierspektren der Leuchtdichteverteilung photographischer Aufnahmen wurde zuerst von VIENOT unternommen. Seine Anordnung entspricht der Abtastung der Leuchtdichtefunktion $g(x,y)$ mit einem langen Spalt, der sich in y-Richtung über das ganze Format erstreckt und in x-Richtung hinreichend schmal ist. Die damit photometrierte Helligkeitsverteilung läßt sich durch einen Photomultiplier in ein elektrisches Signal umwandeln, das man durch ein elektronisches Filter in sein Fourierspektrum $A_1(u)$ zerlegen kann.
Die gemessene Größe $A_1(u)$ ist dann:

$$A_1(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} g(x,y)dy \right] \exp\{-2\pi iux\}dx \qquad /24/$$

Setzt man für das zweidimensionale Spektrum $G(u,v)$:

$$G(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int g(x,y) \exp\{-2\pi i(ux+vy)\}dxdy, \text{ so ist}$$

$$A_1(u) = G(u,0). \qquad /25/$$

Man macht also einen Schnitt durch das zweidimensionale Spektrum entlang der u-Achse. Eine Aussage über den Verlauf der Funktion $G(u,v)$ außerhalb dieser Achse ist durch $A_1(u)$ nicht möglich.

Ein anderer Mittelwert, der noch eine gewisse Information über die zweite Dimension v enthält, wäre:

$$A_2(u) = \overline{G(u,v)G^*(u,v)}^{v} = \int_{-\infty}^{+\infty} G(u,v)G^*(u,v)dv \qquad /26/$$

Das Zeichen $\overline{}^{v}$ bedeutet die Mittelung über die Koordinate v.

Setzt man $G(u,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x,y) \exp\{-2\pi iux\}dx$, so folgt

$$\overline{G(u,v)G^*(u,v)}^{v} = \overline{G(u,y)G^*(u,y)}^{y} \qquad /27/$$

Zur Messung dieser Größe hat man die Leuchtdichteverteilung g(x,y) mit einer hinreichend kleinen Öffnung zeilenweise in x-Richtung (horizontal) abzutasten und die für verschiedene y-Werte erhaltenen Verteilung G(u,y) quadratisch zu mitteln. Diesen Weg gingen RÖHLER/BUCHMANN. Wohl läßt sich jeder Bildstruktur g(x,y) eindeutig ein solcher quadratischer Mittelwert $A_2(u)$ zuordnen, doch ist der Weg zurück nicht mehr möglich, da auch in diesem Falle Informationen über den Betrag von G(u,v) außerhalb der u-Achse zum Teil verloren gegangen sind. Wie BUCHMANN zeigen konnte, sind in dem "reduzierten Wienerspektrum" $A_2(u)$ jedoch noch so viele wesentliche Merkmale der Bildstruktur enthalten, daß sich Korrelationen zum subjektiven Bildeindruck finden lassen. Dies läßt sich verstehen, wenn man bedenkt, daß beim Betrachten eines Bildes ähnlich wie beim Lesen die Horizontale (x-Richtung) in den Blickbewegungen eine Vorzugsrichtung darstellt und damit in etwa dem photometrischen Abtastvorgang entspricht.

Während die Methode von Vienot weder ein Schachbrettmuster noch ein zur Abtastrichtung senkrechtes Streifengitter anzeigen kann, gelingt es mit den Verfahren von RÖHLER/BUCHMANN, zumindest für den Fall des Schachbrettmusters eine Aussage zu machen.

Eine Mittelung, welche beliebig orientierte Raster- und Gitterstrukturen wiedergibt, ließe sich durch einen Quadratischen Mittelwert $A_3(r) = \overline{G(r,\varphi)G^*(r,\varphi)}^{\varphi}$ /28/ erreichen. r und φ sind dabei Polarkoordinaten:

$u = r\cdot\cos\varphi$; $v = r\cdot\sin\varphi$; $r = \sqrt{u^2+v^2}$

Für die Messung hätte man $g(x,y)$ mit einem drehbaren, langen Spalt in verschiedenen Richtungen abzutasten und über den Drehwinkel zu integrieren.

Alle drei Mittelungen haben das Ziel, zu einer möglichst einfachen physikalischen Größe zu gelangen, welche noch die für den subjektiven Bildeindruck maßgebenden Elemente enthält. Abb. 1 veranschaulicht noch einmal diese drei Verfahren. Die Spektralfunktion $|G(u,v)|$ ist durch Höhenlinien in der u,v-Ebene dargestellt. Die verstärkt ausgezogenen Linien geben die Mittelung an.

Die Messung der beschriebenen Größen A_1, A_2, A_3 erfolgt auf photometrischem und elektronischem Wege. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch keines dieser Abtastverfahren sondern eine direkte optische Fouriertransformation angewendet, die unmittelbar zum Energiespektrum $|F(u,v)|^2$ führt.

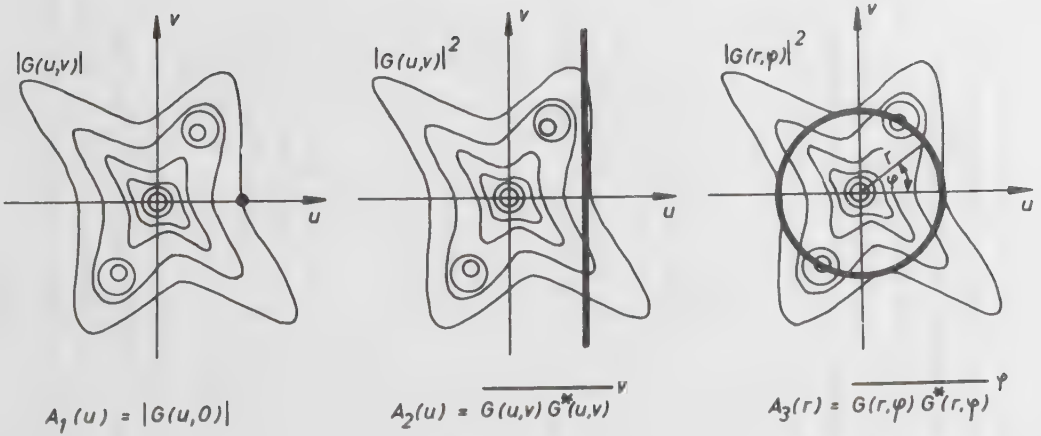


Abb. 1

Fourieranalyse photographischer Bilder

Drei Möglichkeiten zur Vereinfachung der Spektralfunktion bzw.des Wienerspektrums auf eine eindimensionale Funktion. Die verstärkt ausgezogenen Linien geben die Mittelung an.

3. Untersuchungsmethode

Die Untersuchungen gliedern sich in zwei Teile. Zuerst werden auf physikalischem Wege die wesentlichen Strukturparameter bestimmt, wobei der glückliche Umstand benutzt wird, daß das Fraunhofersche Beugungsbild direkt das in Kap. 1.4 definierte Ortsfrequenzspektrum darstellt. Daraufhin wird durch subjektive Testreihen geprüft inwieweit diese Parameter den subjektiven Eindruck bestimmen.

3.1 Objektive Messungen

3.11 Fraunhofersche Beugung

Es sei A die kohärent beleuchtete Beugungsebene (s.Abb. 2). Die komplexe Amplitude des elektrischen Vektors der Lichtwelle sei dort $f_o(x,y)$. Dann läßt sich nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip die Amplitude $F(p,q)$ im Punkt P der Beobachtungsebene B als eine Überlagerung von Kugelwellen darstellen, die von jedem Punkt M der Ebene A ausgehen. Der Abstand zwischen M und P werde mit r bezeichnet. Die Wellenlänge des verwendeten Lichtes sei λ ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ist die Wellenzahl. Mit Benutzung einer Formel von SOMMERFELD läßt sich dann das Huygens-Fresnelsche Prinzip folgendermaßen formulieren:

$$F(p,q,d) = \frac{-e^{-i\omega t}}{2\pi} \iint_A f_o(x,y) e^{ikr} \cos\theta \cdot \left(\frac{ik}{r} - \frac{1}{r^2}\right) dxdy \qquad /29/$$

Der zeitabhängige Term $e^{-i\omega t}$ spielt für die weiteren Betrachtungen keine Rolle. Läßt man ferner nur kleine Beugungswinkel zu und wählt den Abstand d groß, so kann man $\cos\theta \approx 1$ setzen und $\frac{1}{r^2}$ gegen $\frac{ik}{r}$ vernachlässigen. Außerdem läßt sich $\frac{ik}{r} \approx \frac{ik}{d}$ setzen. Damit ergibt sich:

$$F(p,q,d) = \frac{1}{i\lambda d} \iint_A f_o(x,y) e^{ikr} dxdy \qquad /30/$$

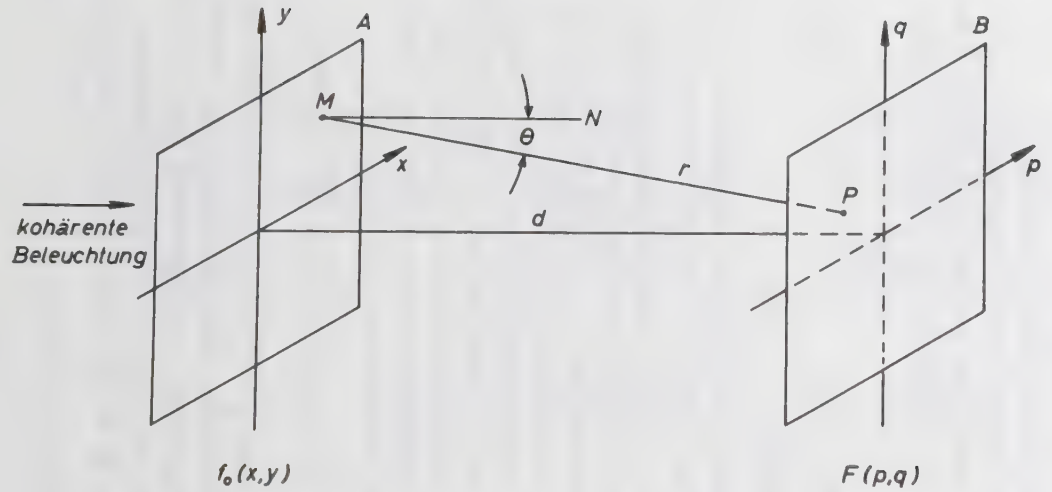


Abb. 2

Fresnelsche Beugung

Die Beugungsebene ist A;B im Abstand d von A ist die zu A parallele Beobachtungsebene

Entwickelt man noch für große d:

$$r \approx d + \frac{1}{2d}\left[(p-x)^2+(q-y)^2\right]$$

so erhält man für die komplexe Amplitude in der Ebene B:

$$F(p,q,d) = \frac{e^{ikd}}{i\lambda d}\iint_A f_o(x,y)\exp\left\{\frac{ik}{2d}\left[(p-x)^2+(q-y)^2\right]\right\}dxdy \quad /31/$$

Gleichung /31/ beschreibt noch den allgemeinen Fall Fresnelscher Beugung, wobei nur hinsichtlich der Beugungswinkel Θ und des Abstandes d gewissen Einschränkungen gemacht wurden.

Die Fraunhofersche Beugung ist nun dadurch definiert, daß auf die Beugungsebene A ebene Wellenfronten auftreffen (Lichtquelle im Unendlichen) und daß die Beobachtungsebene ebenfalls ins Unendliche rückt. Praktisch läßt sich dies nur in der Weise angenähert realisieren, wie es Abb. 3 zeigt. Strenggenommen müßte die Ebene A im parallelen Strahlengang zwischen den beiden Linsen O stehen. Für die Weiterentwicklung der Beugungsanordnung zum "Frequenzfilter" ist es aber zweckmäßiger, A außerhalb und möglichst nahe an die Öffnung des optischen Systems zu setzen (LOWENTHAL/BELVAUX).

Bezeichnet r_o den Abstand ML, so ist bei dieser Anordnung in Gl. /31/ für $f_o(x,y)$ eine Kugelwelle e^{-ikr_o} anzusetzen, die noch mit einer Transparenzfunktion f(x,y) zu multiplizieren ist. f(x,y) ist Durchlässigkeit der Ebene A, d.h. im einfachsten Falle die Pupillenfunktion.

Unter den gleichen Voraussetzungen wie vorhin läßt sich auch r_o entwickeln: $r_o \approx d + \frac{1}{2d}(x^2+y^2)$

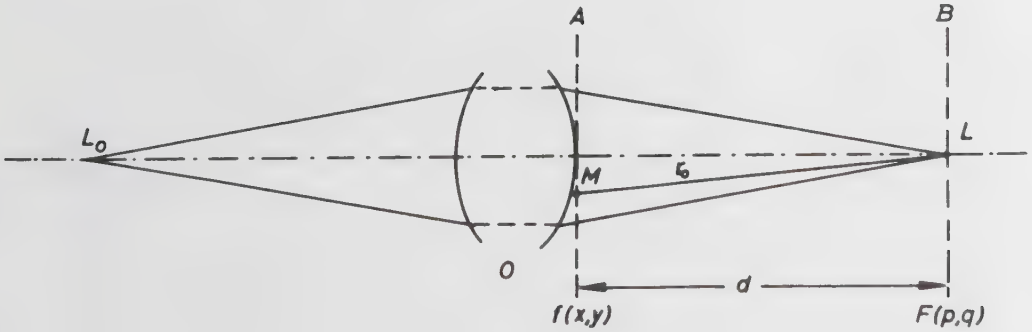


Abb. 3

Fraunhofersche Beugung

Die punktförmige, monochromatische Lichtquelle L_0 wird durch das Linsensystem O in L abgebildet. Die Beugungsebene A stellt die Pupille der optischen Anordnung dar

Aus /31/ folgt dann:

$$F(p,q) = \frac{\exp\left\{\frac{ik}{2d}(p^2+q^2)\right\}}{i\lambda d} \iint_A f(x,y)\ \exp\left\{-\frac{ik}{d}(px+qy)\right\} dxdy$$

beziehungsweise

$$F(p,q) = \frac{\exp\left\{\frac{\pi i}{\lambda d}(p^2+q^2)\right\}}{i\lambda d} \iint_A f(x,y)\exp\left\{-2\pi i\left(\frac{px}{\lambda d}+\frac{qy}{\lambda d}\right)\right\} dxdy \quad /32/$$

Setzt man noch:

$u = \frac{p}{\lambda d}$ und $v = \frac{q}{\lambda d}$ so ergibt sich, abgesehen von einem Phasenterm C, eine Fouriertransformation:

$$F(u,v) = C \iint_A f(x,y)\ \exp\left\{-2\pi i(ux+vy)\right\} dxdy \quad /33/$$

Bringt man in die Ebene A ein Schwarz-Weiß-Diapositiv mit einer Transparenz f(x,y) bezüglich der Lichtamplitude, so erhält man in der Ebene B sein Ortsfrequenzspektrum F(u,v). Das Ausphotometrieren der Intensität im Beugungsbild liefert dann das Energiespektrum $F(u,v)\cdot F^*(u,v)$.

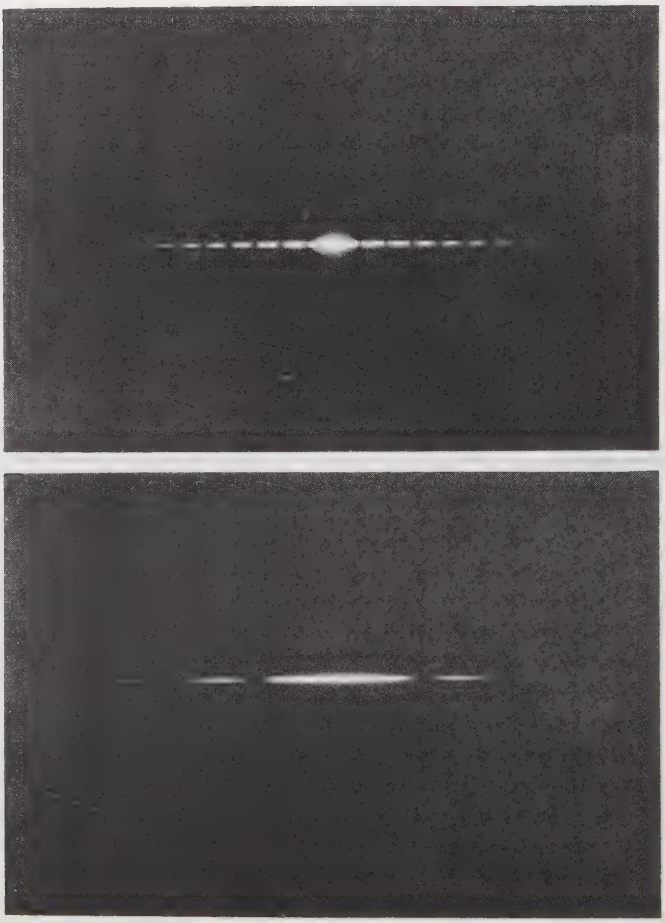


Abb. 4

Beugungsfigur eines weiten(ca.o,35 mm)
und eines engen (ca. o,1 mm) Spaltes

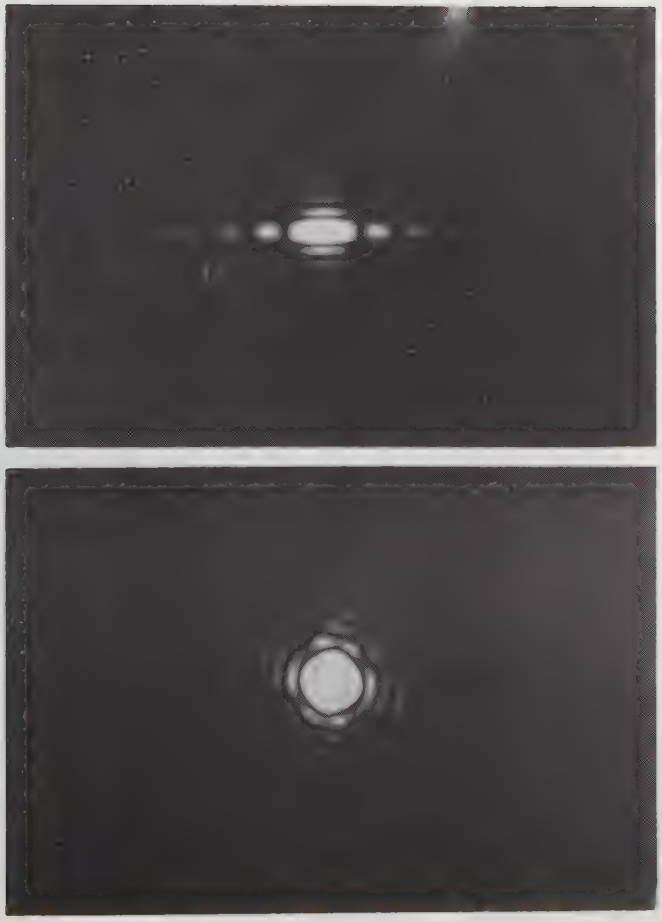


Abb. 5

Spektren einer rechteckigen und einer annähernd kreisförmigen Öffnung

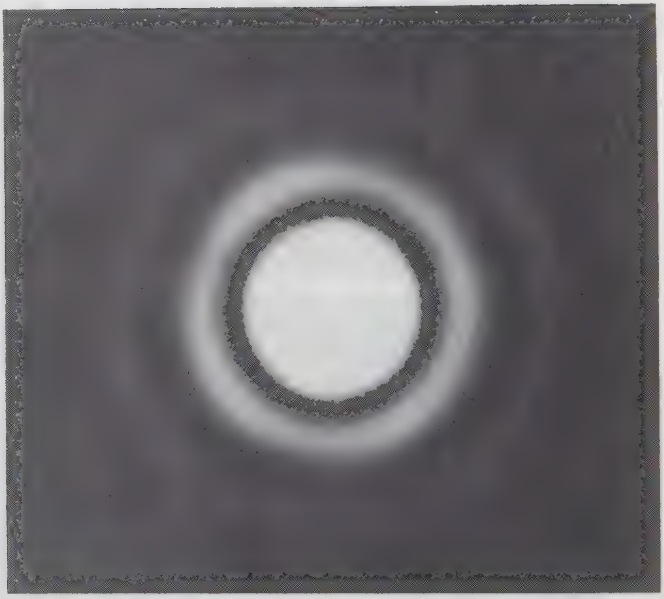


Abb. 6

Spektrum zahlreicher statistisch verteilter runder Öffnungen mit gleichem Durchmesser

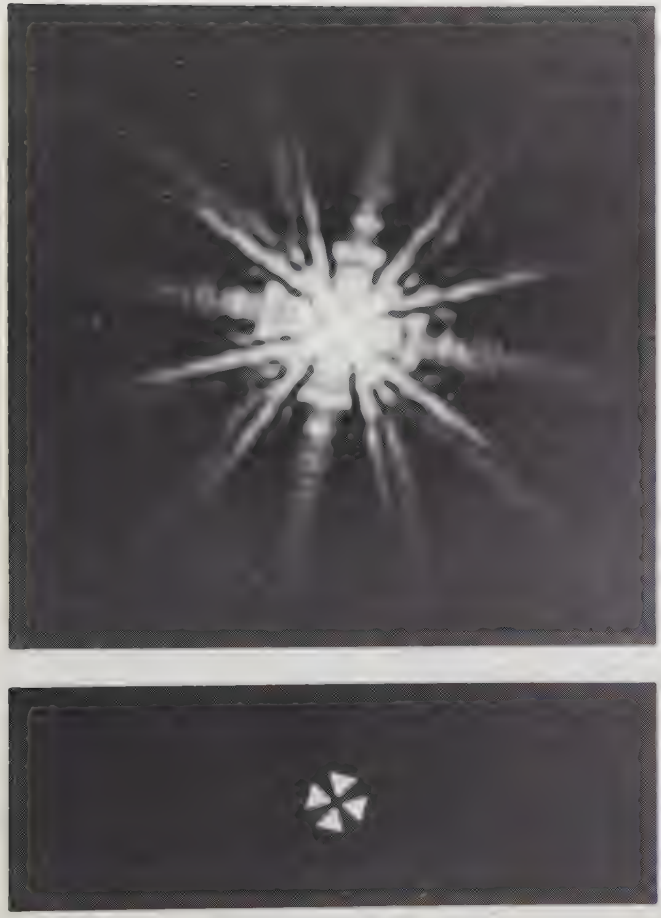


Abb. 7
Kreuzförmige Struktur
und ihr Spektrum

3.12 Ausmessung der Spektren

Im Spektrum F(u,v) sind noch alle Phasenbeziehungen erhalten. Sie gehen jedoch verloren, wenn die spektrale Energieverteilung $|F(u,v)|^2$ gemessen wird.

Die Abb. 4 bis 7 stellen die photographierten Fraunhoferschen Beugungsfiguren einiger einfacher Strukturen dar. Sie geben die Verhältnisse allerdings nur qualitativ wieder, da eine gewisse Verzerrung durch die photographische Emulsion und durch das Umkopieren nicht zu vermeiden ist.

Als Lichtquelle L_0 diente ein von der Rückseite her beleuchtetes Loch von ca. o,1 mm Durchmesser. Die Beleuchtung erfolgte durch eine gleichstrombetriebene Quecksilberdampfhöchstdrucklampe HBo 2oo W, aus deren Spektrum die grüne Linie 546 nm durch ein Interferenzfilter ausgefiltert wurde sowie durch ein Mikroobjektiv Zeiss Plan 16o,32, das als Kondensor diente. Das in Abb. 3 mit O bezeichnete Objektiv war ein Reproobjektiv vom Typ Repro-Claron 1:9 mit 355 mm Brennweite. Dieses speziell für Abbildungsverhältnisse von 1:1 bis 1:3 korrigierte Objektiv besitzt eine so große Öffnung, daß eine Vorlage mit Kleinbildformat 24 x 35 mm nur einen Teil ausblendet. Das Repro-Claron ist ein aus vier Linsen symmetrisch aufgebautes System. Ein Einschub zwischen dem vorderen und hinteren Doppelglied gestattet es, für die Ausmessung des Spektrums das Diapositiv in den parallelen Strahlengang zu setzen, so daß der Fraunhofersche Fall besser realisiert ist.

Die Abb. 4 zeigt die Spektren eines weiten und eines engen Spaltes. Durch seine endliche Länge ergibt sich

auch in der Beugungsfigur in der zweiten Koordinate eine gewisse Breite. Infolge der großen Intensitätsunterschiede ist das Zentrum etwas überstrahlt.

In Abb. 5 erkennt man die Energiespektren einer rechteckigen und einer kreisförmigen Öffnung. Bei letzterer sieht man deutlich, daß keine vollständige Rotationssymmetrie vorliegt. Durch das Bohren der kleinen Öffnung von ca. o,5 mm Durchmesser entstand kein rundes, sondern ein etwas ausgefranstes Loch.

Verteilt man viele kleine annähernd kreisförmige Öffnungen statistisch über die Pupille des Objektivs, so erhält man Abb. 6, bei der sich die Unregelmäßigkeiten der einzelnen Öffnungen weitgehend herausgemittelt haben.

Abb. 7 ist das Spektrum einer kreuzförmigen Figur.

Abgesehen von Nichtlinearitäten durch die photographische Emulsion zeigen die Aufnahmen den Verlauf der Funktion $|F(u,v)|^2$. Das zentrale Maximum der Beugungsfigur, die "Nullfrequenz" gibt die mittlere Helligkeit der Vorlage wieder.

Für genauere Messungen wurde nicht ein photographischer Film, sondern eine Photometeranordnung benutzt. Sie bestand aus einer rechteckig begrenzten Abtastöffnung in der Ebene B der Beugungsfigur mit den Abmessungen o,o5 x o,1 mm und einem Photomultiplier. Eine Streuscheibe vor seiner Kathode genügte, um das durch den Abtastspalt tretende Licht gleichmäßig zu verteilen. Die gesamte Anordnung war in der Höhe verstellbar. Mit Hilfe eines Motors und eines Verschiebereiters tastete die Photometeröffnung jeweils eine Zeile im Spektrum ab.

Der Multiplierstrom wurde über einen Arbeitswiderstand in eine proportionale Spannung umgewandelt und von einem Kompensationsschreiber aufgezeichnet. Diese Anordnung, bestehend aus Beugungsvorrichtung und Photometer, lieferte trotz ihres relativ einfachen Aufbaues folgenden Rechengang:

$$f(x,y) \xrightarrow{F.T.} F(u,v) \longrightarrow |F(u,v)|^2$$

Die Abb. 8 zeigt den gesamten Versuchsaufbau.

Die Fehlerquellen und das Auflösungsvermögen werden bei der Anordnung zur Frequenzfilterung im nächsten Abschnitt besprochen. Einen Hinweis auf die Genauigkeit möge noch folgende Gegenüberstellung geben. In der 1. Spalte sind die für ein Streifengitter mit dem Rasterverhältnis 1:1,3 (Breite der durchlässigen Zwischenräume:Breite der undurchlässigen Streifen) gerechneten Werte des Energiespektrums angegeben. Die zweite Spalte zeigt die mit der beschriebenen Anordnung gemessenen Daten. Normiert wurde jeweils auf die Grundwelle 4 L/mm.

Ortsfrequenz L/mm	berechnete relative Amplitude	gemessene rel. Amplitude im Beugungsbild
4	1oo	1oo
8	4,o	4,2
12	7,3	7,8
16	3,o	2,9
2o	1,2	1,8
24	2,o	1,8

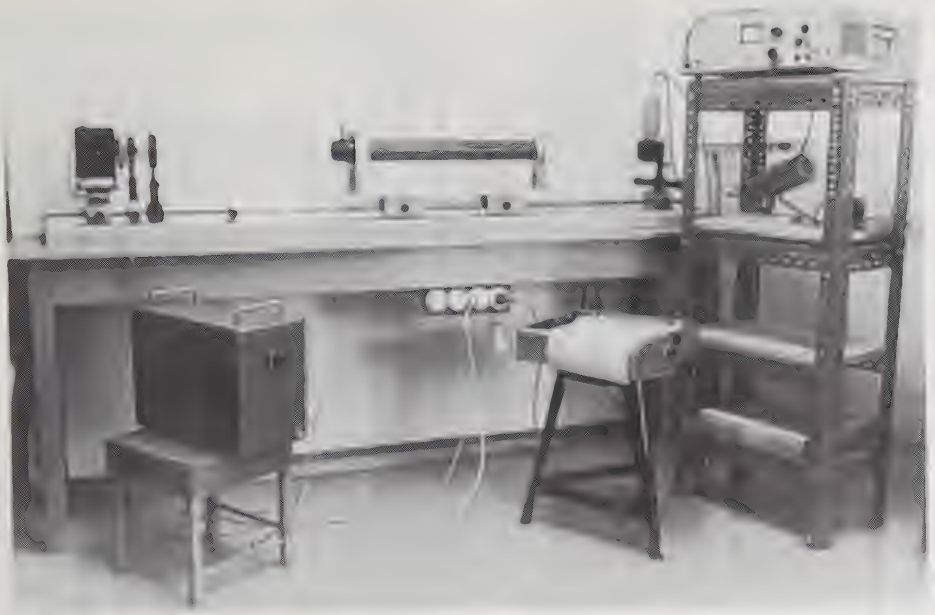


Abb. 8

Gesamtansicht der Anordnung zur optischen Fouriertransformation mit Beleuchtungsteil, Reproobjektiv und Photometriereinrichtung. Die Streulichtblenden sind teilweise abgenommen.

3.13 Frequenzfilterung

Die in Abb. 3 dargestellte Anordnung läßt sich zu einem Frequenzfilter erweitern. Abb. 9 zeigt das Prinzip. A ist wiederum die Beugungsebene. Sie enthält das zu filternde Negativ oder Diapositiv. In B entsteht das Fraunhofersche Beugungsbild, d.h. das Ortsfrequenzspektrum. Mit dem Objektiv O_2 wird die kohärent beleuchtete Vorlage auf den Film C abgebildet. Wie in Kap. 3.11 gezeigt wurde, ist der Zusammanhang zwischen den Amplituden der Lichtwellen in den Ebenen A und B durch eine Fouriertransformation gegeben. In gleicher Weise findet von B nach C erneut eine Fouriertransformation statt, so daß in C wieder das ursprüngliche Bild entsteht. Die komplexe Amplitude r(x',y') in der Ebene C ist deshalb:

$$r(x',y') = \int_{-\infty}^{+\infty}\int F(u,v)\cdot H(u,v)\, \exp\left\{2\pi i(ux'+vy')\right\} dudv \qquad /34/$$

F(u,v) ist die komplexe Amplitude in der Ebene B und zugleich das Ortsfrequenzspektrum. H(u,v) ist die Pupillenfunktion in der Ebene B. Mit Hilfe des Faltungssatzes, d.h. durch Fouriertransformation der Gl. /34/ ergibt sich:

$$r(x',y') = f(x,y) * h(x,y) \qquad /35/$$

Man erhält also das Bild r(x',y') durch Faltung des Objektes f(x,y) mit einem "Punktbild" h(x,y), das die Fouriertransformierte der Pupillenfunktion H(u,v) ist. Im Frequenzraum läßt sich diese Beziehung durch die Gleichung

$$R(u,v) = F(u,v)\cdot H(u,v) \qquad /36/$$

darstellen. Der Einfachheit halber ist dabei ein Abbildungsverhältnis im Maßstab 1:1 zwischen dem

Objekt f(x,y) und dem Bild r(x',y') vorausgesetzt.

Die Pupillenfunktion H(u,v) ist gleichzeitig die Übertragungsfunktion des Systems. Es wirkt im Prinzip als Tiefpaß, da die Öffnung von O_2 in jedem Falle das Spektrum zu hohen Ortsfrequenzen hin begrenzt. Man kann sie jedoch so groß wählen, daß zumindest alle für die abgebildete Struktur maßgeblichen Frequenzbereiche durchgelassen werden. Durch Einbringen geeigneter Blenden in die Ebene B lassen sich dann beliebige Übertragungsfunktionen und Frequenzfilter realisieren. Lochblenden bewirken ein Abschneiden der hohen Ortsfrequenzen in Gestalt der peripheren Teile des Beugungsbildes. Man spricht dann in Analogie zur Elektronik von Tiefpässen. In gleicher Weise lassen sich durch Ringblenden bestimmte Frequenzbänder ausfiltern(Bandsperren) oder übertragen (Bandpässe).

Beschränkt man die Filterung auf bestimmte Richtungen, so kann dieses Verfahren auch zur automatischen Zeichenerkennung verwendet werden (Lowenthal/Belvaux).

Für die Zwecke der vorliegenden Arbeit leistet die eben beschriebene Anordnung folgende Operationen (F.T. = Fouriertransformation):

$$f(x,y) \xrightarrow{F.T.} F(u,v) \longrightarrow F(u,v)\cdot H(u,v) \xrightarrow{(F.T.)^{-1}} r(x',y')$$

Signal — Spektrum — Filterung — Bild

Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 1o. Es wurden zum Teil wieder Bauteile der in Kap. 3.11 beschriebenen Anordnung benutzt. Als Objektiv O_1 (s.Abb. 9) diente ein Projektionsobjektiv Hektor 1:1,5 mit 15o mm Brennweite. Das Objektiv O_2 war wieder das bereits beschriebene Repro-Claron. Die unmittelbar vor ihm anzubringende Halterung

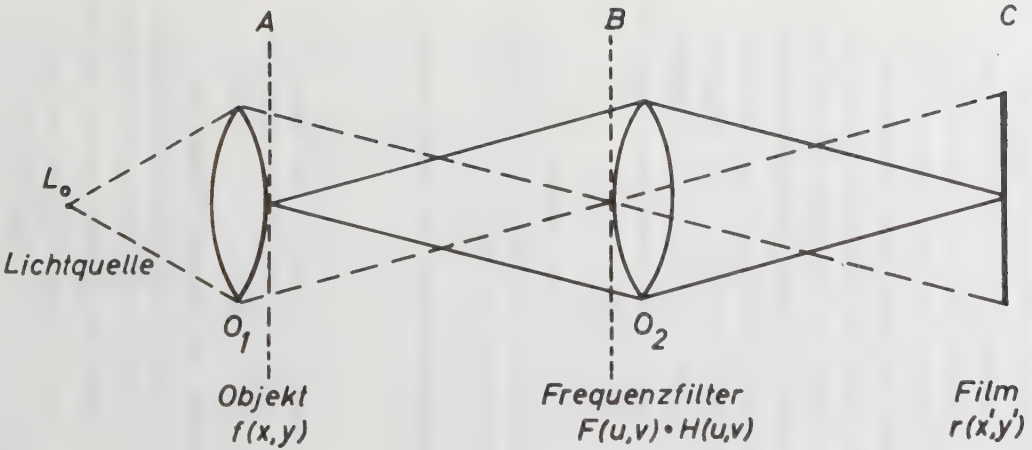


Abb. 9

Anordnung zur Ortsfrequenzfilterung

L_o ist eine punktförmige monochromatische Lichtquelle, O_1 und O_2 sind Objektive; A stellt die Beugungsebene und B die Ebene für die Ausblendung bestimmter Ortsfrequenzbereiche dar.

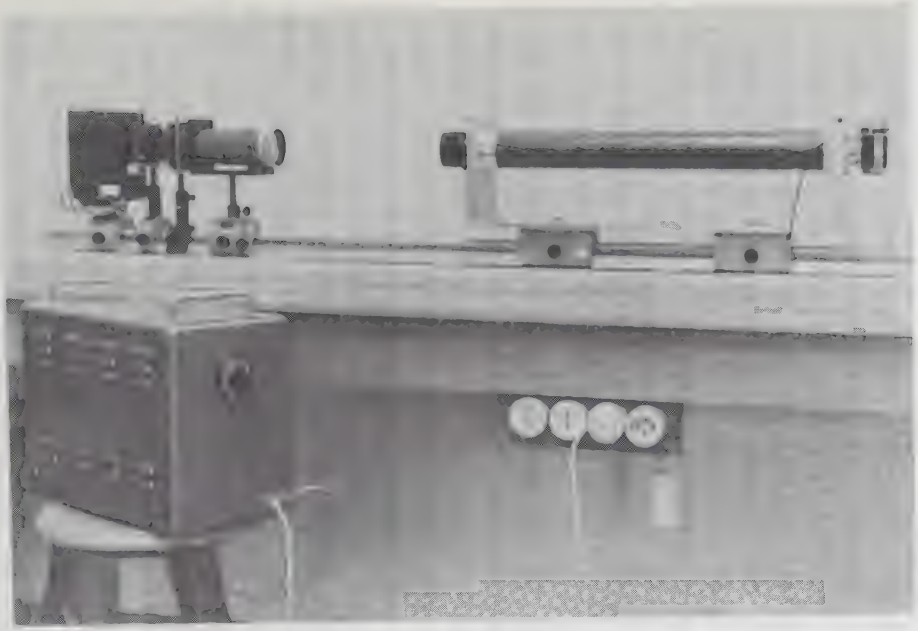


Abb. 1o

Versuchsaufbau zur Ortsfrequenzfilterung, bestehend aus : Beleuchtungsteil,Objektiv 1 und Repro-Objektiv mit Kamera

für die verschiedenen Blenden wurde für die Aufnahme 1o entfernt. Das gefilterte Bild wird mit einer Kleinbildkamera photographiert, die in der Abbildung 1o ganz rechts zu sehen ist.

Ein derartiges Frequenzfilter wirkt grundsätzlich immer im Sinne einer Bildverschlechterung. Die Eingriffe können aber in definierter Weise vorgenommen werden und zwar so, daß gewisse Bildelemente stärker betont, andere jedoch abgeschwächt werden. Die Abb. 11 bis 25 sollen die Wirkungsweise von Frequenzfilterungen veranschaulichen.

Die Abb. 11 und 15 sind die ungefilterten Originale, ein Teststern und ein Landschaftsmotiv.

In den Abb. 12 bis 14 und 16 bis 18 wurden beide Vorlagen in zunehmendem Maße einer Tiefpaßfilterung unterworfen. Beim Stern verschwinden die zentralen Teile, welche die hohen Ortsfrequenzen enthalten, beim Landschaftsmotiv gehen die feinen Details verloren; das Bild wird unschärfer (Weichzeichnereffekt). Diese Unschärfe unterscheidet sich wesentlich von jener, die man durch Defokussierung erhält. Bei einem echten Tiefpaß wird von einer bestimmten Grenze U an $F(u,v) \equiv 0$ für $u > U$, während bei der Defokussierung auch noch höhere Ortsfrequenzen auftreten, deren Phasenlage allerdings teilweise um eine halbe Periode verschoben ist.

Die Photographien 19 und 21 sind durch Abbildung mit einer Bandsperre erzielt worden. Ein gewisses, scharf begrenztes Ortsfrequenzband wurde herausgeschnitten. Die beim Teststern an der entsprechenden Stelle auftretende feinere Struktur ist die erste Oberwelle,

die bei einem Rechteck-Kontrast zu erwarten ist. Das Landschaftsmotiv vermittelt einen subjektiven Eindruck, wie er ganz ähnlich auch bei einer Defokussierung auftritt. In beiden Fällen stört offenbar besonders die Tatsache, daß das Spektrum in einem mittleren Frequenzbereich an bestimmter Stelle unterdrückt wird, während höhere Ortsfrequenzen erhalten bleiben. Die Phasenumkehr bei der Defokussierung scheint in diesem Zusammenhang nicht so wesentlich zu sein, wie man bisher annahm.

Die Abbildungen 2o, 22 und 23 zeigen die Wirkung von hoch- und niederfrequenten Bandpässen. Es wurde jeweils nur ein schmales Frequenzband bei der Abbildung durchgelassen.

Die Abbildungen 24 und 25 sind Hochpässe. Im Falle des Teststernes wurde mit den niedrigen Ortsfrequenzen auch die "Nullfrequenz", also die mittlere Helligkeit, ausgeblendet, so daß keine lineare Übertragung mehr gewährleistet war. Diese Art der Abbildung entspricht etwa einer Differentiation, bei der im wesentlichen nur die in der Vorlage enthaltenen Kantenstrukturen übertragen werden.

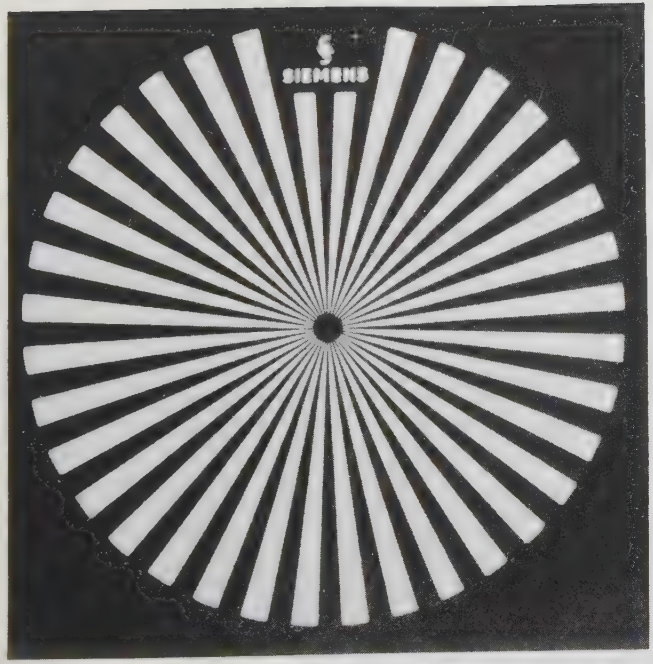


Abb. 11
Ungefiltertes Original des Teststernes

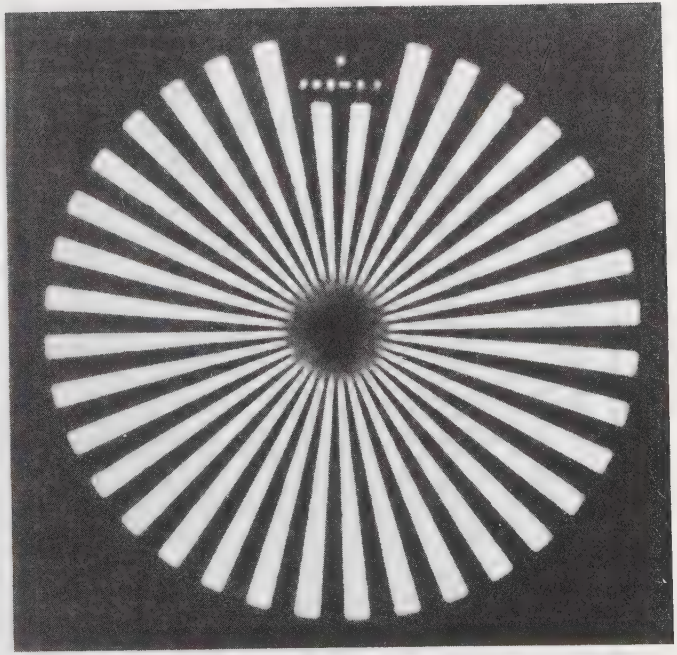


Abb. 12
Tiefpaßgefilterte Aufnahme des Teststernes

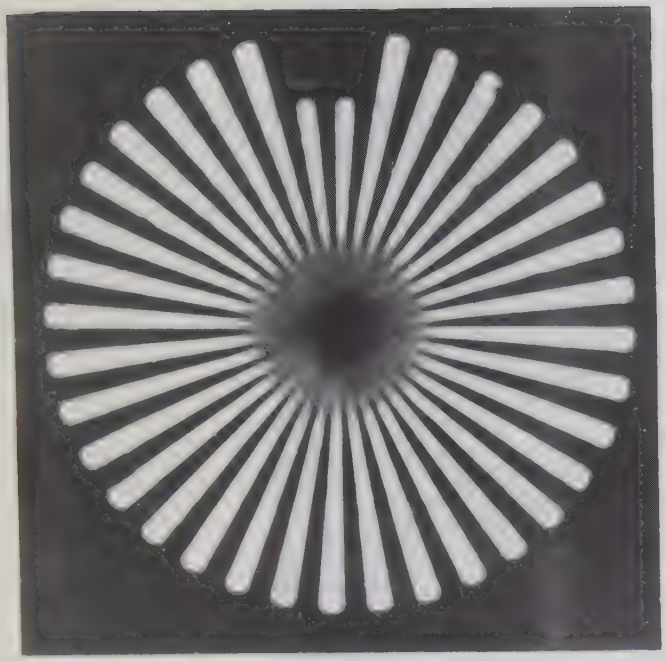


Abb. 13

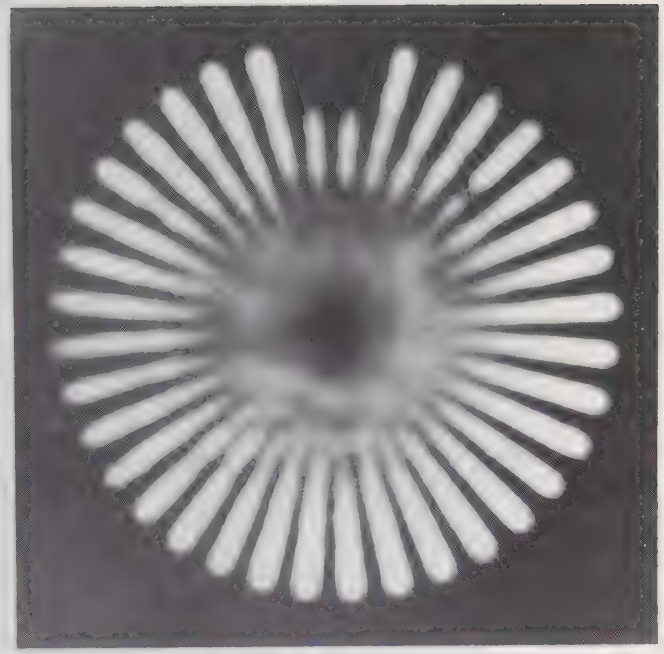


Abb. 14

Tiefpaßgefilterte Aufnahmen des Teststernes

Abb. 15
Ungefilterte Aufnahme eines Landschaftsmotivs

Abb. 16
Tiefpaßgefilterte Aufnahme des Landschaftsmotives

Abb. 17
Tiefpaßgefilterte Aufnahme des Landschaftsmotives

Abb. 18
Tiefpaßgefilterte Aufnahme des Landschaftsmotives

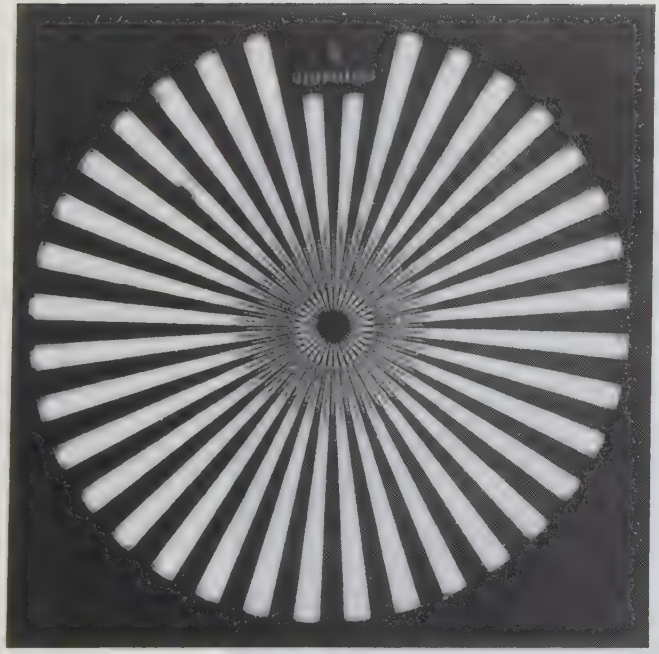


Abb. 19

Durch eine Bandsperre erzeugte
Aufnahme des Teststernes

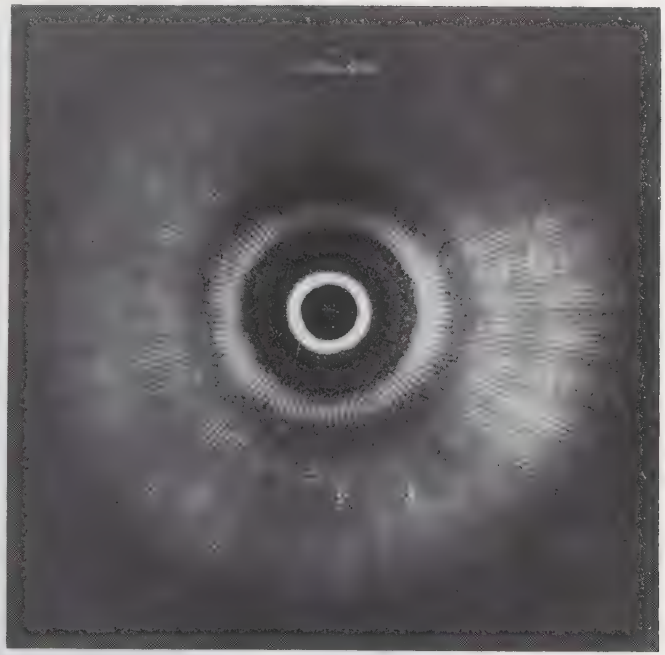


Abb. 2o

Durch einen Bandpaß erzeugte
Aufnahme des Teststernes

Abb. 21
Durch eine Bandsperre erzeugte Aufnahme des Landschaftsmotives

Abb. 22
Durch einen niederfrequenten Bandpaß erzeugtes Bild

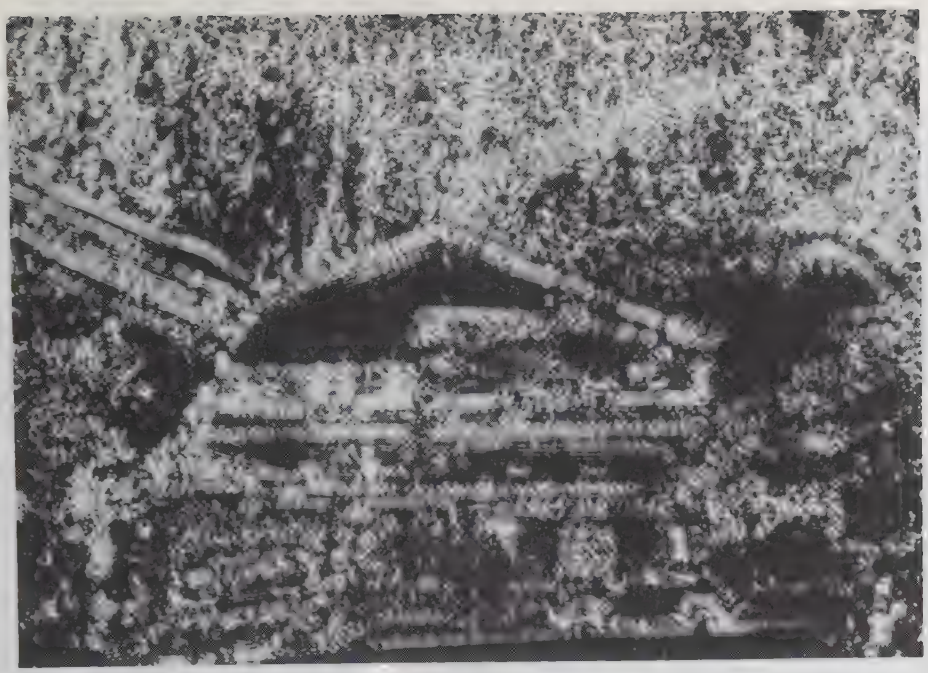


Abb. 23
Durch einen hochfrequenten Bandpaß erzeugtes Bild

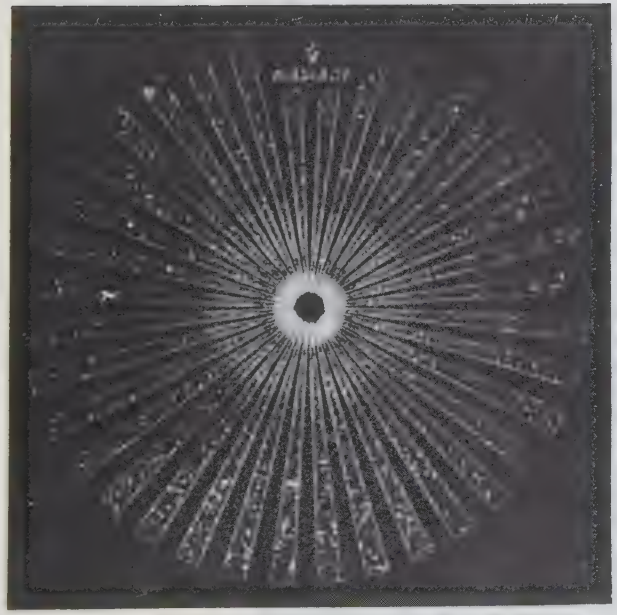


Abb. 24 Abb. 25

Hochpaßfilterung der Originale in den Abbildungen 11 und 15

3.14 Fehlerquellen und Auflösungsvermögen

Sowohl bei der Ausmessung der Spektren als auch bei der Frequenzfilterung liegt eine wesentliche Fehlerquelle in der unvollständigen Kohärenz des Lichtes. Selbst unter der Voraussetzung einer idealen punktförmigen, monochromatischen Lichtquelle ist keine vollständige Kohärenz zu erwarten, da an den Linsenoberflächen durch Staub und Kratzer immer Streulicht entsteht. In besonderem Maße wird es aber im photographischen Diapositiv bzw. Schwarz-Weiß-Negativ gebildet, das in die Beugungsebene eingebracht wird. Man muß aus diesem Grunde ein möglichst klares, dünnschichtiges Filmmaterial verwenden. Mit Röntgenfilmen ist eine Frequenzfilterung auf diese Weise z.B. nicht möglich, da sie praktisch wie Mattscheiben wirken. Ein kleiner Teil der Abbildung findet aber in jedem Falle durch inkohärentes Streulicht statt.

Die Vorlage soll eine reine Amplitudenmodulation bewirken. Tatsächlich kommen aber auch Phasenänderungen vor. Sie entstehen vor allem durch Schlieren oder Kratzer in der photographischen Emulsion, die mit bloßem Auge kaum zu erkennen sind, bei der Frequenzfilterung ähnlich wie beim Phasenkontrastverfahren im Mikroskop aber deutlich hervortreten. Dieser Fehler läßt sich vermeiden, wenn man das Diapositiv zwischen planparallele Glasplatten preßt, nachdem man es in Flüssigkeit mit geeignetem Brechungsindex getaucht hat. Meist genügt jedoch eine sorgsame Oberflächenbehandlung im Anschluß an das Fixieren des Films mit handelsüblichen Trockenmitteln, deren Brechungsindex dem der Filmträgerschicht sehr nahe kommt.

Das spektrale Auflösungsvermögen bei der Ausmessung der

Ortsfrequenzspektren hängt von der spektralen Bandbreite bezüglich der Wellenlänge des verwendeten Lichtes ab, aber auch von der Größe der als Lichtquelle dienenden Lochblende, von Vergrößerung und Aberrationen des Objektives O_1 und von den Abmessungen der Abtastöffnung. Bezogen auf das zu analysierende Diapositiv betrug das Auflösungsvermögen o,2 - o,3 L/mm.

Die in Kap. 3.11 abgeleitete Fouriertransformation gilt nur für geringe Beugungswinkel. D.h. bei hohen Ortsfrequenzen sind Abweichungen zu erwarten. Der praktisch interessante Spektralbereich erstreckte sich für die Kleinbildvorlagen von etwa 1 L/mm bis 3o L/mm. In diesem Bereich traten noch keine merklichen Abweichungen auf.

Eine weitere Schwierigkeit bereitet die Tatsache, daß die photographische Emulsion nichtlineare Übertragungseigenschaften aufweist und damit die aufbelichtete Intensitätsverteilung verzerrt. Obwohl dieser Effekt, wie Abb. 27 zeigt, gering ist, wurde doch für jedes gefilterte Testdiapositiv das Spektrum eigens ausgemessen.

3.2 Anwendung der Ortsfrequenzfilterung auf Fragen der subjektiven Detailerkennbarkeit

3.21 Prinzip der Untersuchungen

Von der objektiven, physikalischen Seite her wurden die Untersuchungen in folgender Weise durchgeführt:

1. Durch Frequenzfilterung konnten in beliebig kleinen Schritten aus dem Spektrum einer vorgegebenen Struktur gewisse Bereiche ausgeschnitten werden, die dann dem Testdiapositiv fehlten.
2. Das Spektrum jeder Testvorlage wurde durch Ausphotometrieren der Beugungsfigur bestimmt.
3. Der Energiegehalt der Spektren konnte durch Planimetrieren der erhaltenen Photometerkurven bestimmt werden.

Mit diesen Hilfsmitteln wurden folgende Fragestellungen untersucht.

1. Wie groß müssen die Unterschiede zwischen zwei Bildern sein, damit ein Beobachter sie als verschieden erkennt ? Zu diesem Zweck wurden zwei Testreihen durchgeführt. Die erste betraf verschieden stark tiefpaßgefilterte Testbilder, während in der zweiten Diapositive untersucht wurden, die durch unterschiedlich breite Bandsperren hergestellt worden waren.
2. Die zweite Fragestellung behandelt die Erkennbarkeit eines Testzeichens in einem strukturierten Umfeld. Untersucht wurde dabei die Schwelle der Erkennbarkeit für ein Gitter in Abhängigkeit vom Spektrum der Störstruktur.

3.22 Versuchsdurchführung

Für die praktische Durchführung der oben genannten Untersuchungen ergibt sich die Schwierigkeit, daß der menschliche Gesichtssinn beim Vergleich verschiedener Testbilder ungemein sicher unterscheiden kann, so daß es nur schwer gelingt, bei den physikalischen Messungen eine vergleichbare Genauigkeit zu erzielen. Besser ist die Situation bei eindimensionalen Vorlagen, auf die sich die folgenden Untersuchungen beschränken. In diesem Fall ist es möglich, die physikalischen Strukturunterschiede um fast eine Größenordnung genauer zu bestimmen als es durch subjektive Testreihen geschieht. Damit kann man zumindest von der physikalischen Seite her genau genug angeben, was die Testperson zu erkennen vermag. Die Abb. 28 zeigt die verwendete eindimensionale Struktur (Strichmuster). Sie wurde von einem Schreiber gezeichnet, der an die Rechenmaschine TR4 der Bayer. Adademie der Wissenschaften angeschlossen war. Auf dem Bogen waren 2ooo Plätze für Einzelstriche vorhanden. Der Computer ermittelte nach einem Zufallsprogramm für jeden Platz den Befehl an den Schreiber, ob eine senkrechte Linie zu ziehen war oder nicht. Dadurch entstand ein statistisches Strichmuster, wie es die Abb. 28 zeigt. Die vom Schreiber gezeichnete Vorlage wurde schließlich auf das Format 24 x 24 mm verkleinert. Die Breite eines einzelnen Striches entsprach dann einer Ortsfrequenz von 36 L/mm.

Die Testdias wurden 29,7-fach vergrößert auf einen Betrachtungsschirm projiziert, der vom Beobachter 2,25 m entfernt war. 1o L/mm auf dem Testdia entsprachen o,22 Perioden pro Winkelminute im Auge des Beobachters. Bei der Projektion der Testbilder mußte in jedem Falle die Modulationsübertragungsfunktion des verwendeten Objektives

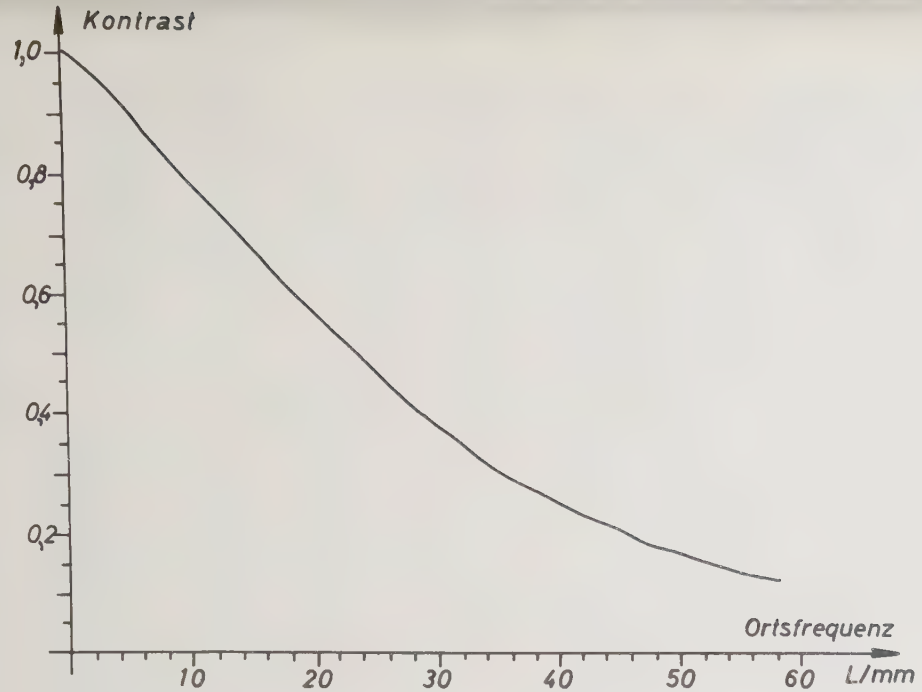


Abb. 26

Modulationsübertragungsfunktion des Objektivs, das zur Projektion der Testbilder verwendet wurde.

(Hektor 1:2,8 1oo mm Brennweite) berücksichtigt werden. Sie ist in Abb. 26 angegeben.

Die Untersuchung der tiefpaßgefilterten bzw. durch Bandsperren erzeugten Testbilder wurde in der Weise vorgenommen, daß immer zwei Bilder hintereinander dargeboten wurden. Die Testperson mußte sich entscheiden, welches von beiden dem Original ähnlicher war. Bei exakt gleichen Testvorlagen ist zu erwarten, daß beide gleich häufig bevorzugt werden (5o% richtige Aussagen). Besteht dagegen ein merklicher Unterschied, so steigt die Erkennungsrate an. Eine immer noch umstrittene Frage ist, bei welchem Prozentsatz (6o % bis 7o %) in diesem Fall die Schwelle anzusetzen ist. In der vorliegenden Arbeit wird darauf nicht näher eingegangen, da nur die Korrelation zwischen objektiven und subjektiven Kriterien aufgezeigt werden soll.

Bietet man ein Testzeichen in einem strukturierten Umfeld dar, so treten bei den Beobachtern anfangs gewisse Anpassungsschwierigkeiten auf, die besonders deutlich sind, wenn es sich um eine streng geordnete Störstruktur handelt. Versteckt man beispielsweise ein regelmäßiges, deutlich überschwelliges Strichgitter in einem Landschaftsmotiv, so benötigt eine Testperson im allgemeinen eine geraume Zeit, bis sie es erkennt. Wurde es aber einmal gesehen, so kann man den Kontrast weit herabsetzen, ohne daß man unter die Schwelle der Erkennbarkeit gerät. Der Grund dafür ist darin zu suchen, daß das informationsreiche Landschaftsbild von der eigentlichen Aufgabe stärker ablenkt als etwa eine unregelmäßige körnige Struktur.

Für die Schwelle selbst sind offenbar im wesentlichen nur diejenigen Elemente der zweidimensionalen Störstruktur maßgebend, die in gleicher Richtung wie das Testgitter verlaufen und deren Energieanteil im Verhältnis

zur gesamten zweidimensionalen Energiefunktion relativ gering ist. Es wurde deshalb in der bereits erwähnten statistischen Strichstruktur durch eine Zweitbelichtung ein regelmäßiges Raster verborgen. Durch Tiefpaßfilterung wurde das Störspektrum stufenweise beschnitten. Die Testpersonen mußten herausfinden, ob sich auf dem Bild ein regelmäßiges Raster befand, das sich über das ganze Format erstreckte. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im nächsten Kapitel zusammengefaßt.

4. Experimentelle Ergebnisse und Auswertung

4.1 Einfluß des photographischen Prozesses

Beim Photographieren eines Negativs mit der Anordnung zur Frequenzfilterung muß der Einfluß der Filmemulsion berücksichtigt werden. Der verwendete Film (Agfa Agepe FF) wurde jeweils mit einem Feinkornentwickler (Neofin) auf eine Gradation von $\gamma = 1$ entwickelt. Trotzdem können noch gewisse nichtlineare Effekte bei der Abbildung auftreten. In der Abb. 27 sind die Spektren des Negativs und des ohne Frequenzeingriffe erhaltenen Positivs der statistischen Gitterstruktur aufgetragen. Die spektralen Energieverteilungen stimmen in beiden Fällen recht gut miteinander überein. Die Unterschiede sind nur gering; sie erweisen sich aber doch als signifikant. Deshalb ist es besser, die Spektren der Positive nicht mit Hilfe der jeweils vorgegebenen Übertragungsfunktion zu berechnen sondern direkt auszumessen.

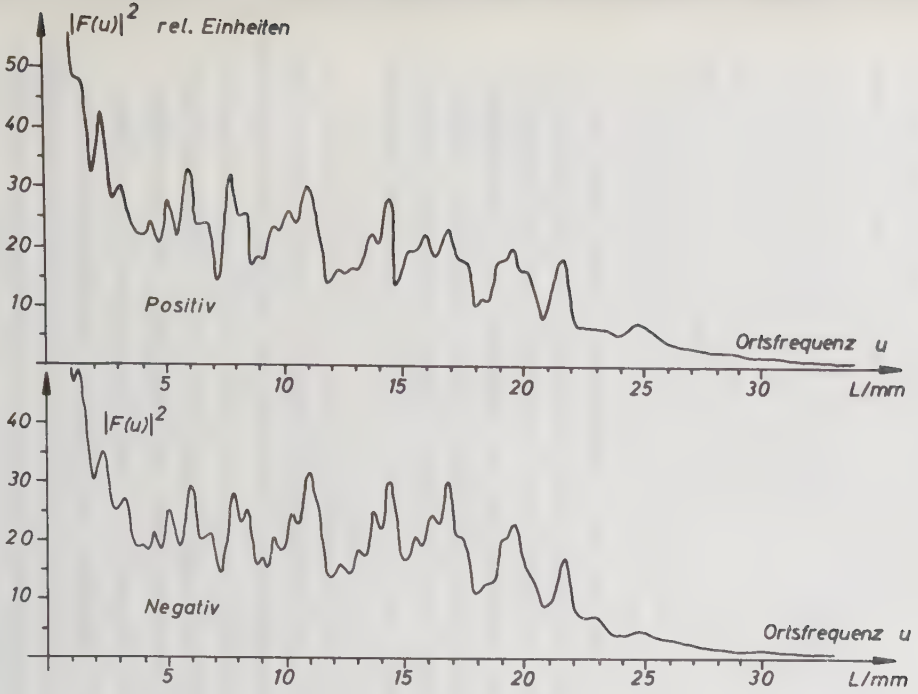


Abb. 27

Spektren eines photographischen Negativs
und des daraus gewonnenen Diapositivs

4.2 Bedeutung der "Nullfrequenz"

Das zentrale Beugungsmaximum, die sog. Nullfrequenz, stellt die mittlere Transparenz der Vorlage dar. Sie enthält einen wesentlichen Teil der gesamten Energie, ohne eine Information über den Bildinhalt zu liefern. Die für die vorliegenden Untersuchungen wichtigen Strukturmerkmale betrafen den mittleren und hochfrequenten Teil des Spektrums. Die mittlere Helligkeit der Vorlagen wurde dabei für alle Bilder einer Testreihe konstant gehalten. Es ist deshalb zweckmäßig, bei der Auswertung der Spektren von der Nullfrequenz abzusehen und eine untere Frequenzschranke anzunehmen, unterhalb der keine wesentlichen Strukturmerkmale mehr vorhanden sind. Sie betrug bei den verwendeten Testbildern ca. o,8 L/mm. Das entspricht in etwa auch der unteren Grenze, die man erreicht, wenn man durch photometrische Abtastung das Wienerspektrum bezüglich der Leuchtdichteverteilung einer Bildvorlage mißt. Es genügt dabei, diese Schranke abzuschätzen, da kleine Verschiebungen keine wesentlichen Fehler für die vorliegenden Untersuchungen mit sich bringen.

Führt man einen Frequenzeingriff in der Form durch, daß die Nullfrequenz ausgefiltert wird, so ergibt sich eine nichtlineare Abbildung, in der nur noch scharfe Kantenstrukturen übertragen werden (Abb. 24). Trotzdem bleiben einige Grundzüge des ursprünglichen Bildes erhalten, die eine Reihe von Details erkennen lassen. Es ist deshalb durchaus verständlich, daß in den bereits erwähnten Arbeiten von HIGGINS et all. die Kantenschärfe als der entscheidende Parameter in der Beurteilung photographischer Aufnahmen bezeichnet wird.

4.3 Tiefpaßgefilterte Testbilder

Als objektives Maß für den Strukturunterschied zweier verschieden stark tiefpaßgefilterter Bilder diente die relative Energiedifferenz $\Delta z/\bar{z}$:

$$\Delta z/\bar{z} = 2(z_1-z_2)/(z_1+z_2)$$

$z_{1,2}$ bezeichnet den Energieinhalt des jeweiligen Spektrums im Frequenzbereich $u \geq 0{,}8$ L/mm.

Es ist also: $z_1 = \int_{0{,}8}^{\infty} |F_1(u)|^2 du$

$\bar{z}$ ist der Mittelwert von z_1 und z_2.

Die Abbildungen 28 und 29 zeigen die originale und eine stark tiefpaßgefilterte Teststruktur. In Abb. 31 sind die Spektren einiger Bilder aus dieser Versuchsreihe aufgetragen. Man erkennt die Steilheit der Abschneidekante und die Abstufungen zwischen den einzelnen Bildern.

Im Diagramm 32 sind die Ergebnisse der subjektiven Aussagen dargestellt. Jeder Meßpunkt bedeutet die Beurteilung einer bestimmten Bildkombination und stellt einen Mittelwert über 5o Einzelergebnisse dar, die durch fünf Testpersonen mit jeweils 1o Aussagen erhalten wurden. Es mußte dabei angegeben werden, welches von zwei motivgleichen, hintereinander dargebotenen Bildern das schärfere war. Die als Rechtecke eingezeichneten Schwerpunkte lassen sich durch eine Kurve verbinden, die innerhalb der Fehlergrenze als eine Gaußfunktion dargestellt werden kann. Geringe Unterschiede $\Delta z/\bar{z}$ zwischen zwei Bildern werden praktisch nicht erkannt; d.h. jedes der beiden wird im Mittel gleich häufig vorgezogen (5o % richtige Aussagen), wenn eine Entscheidung getroffen werden muß.

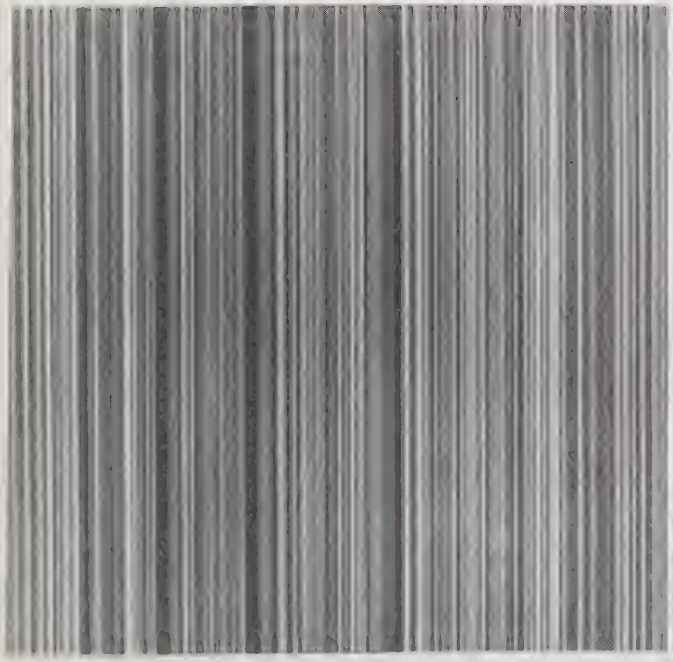


Abb. 28
ungefilterte Teststruktur

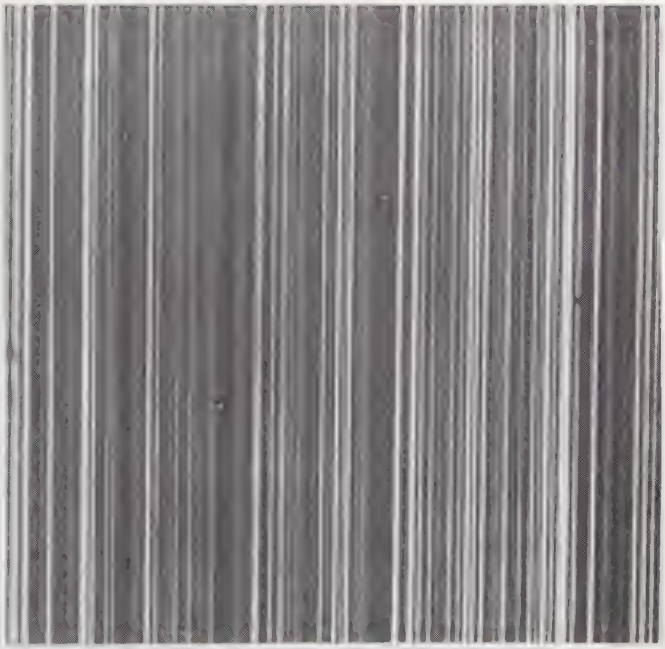


Abb. 29
tiefpaßgefilterte Teststruktur

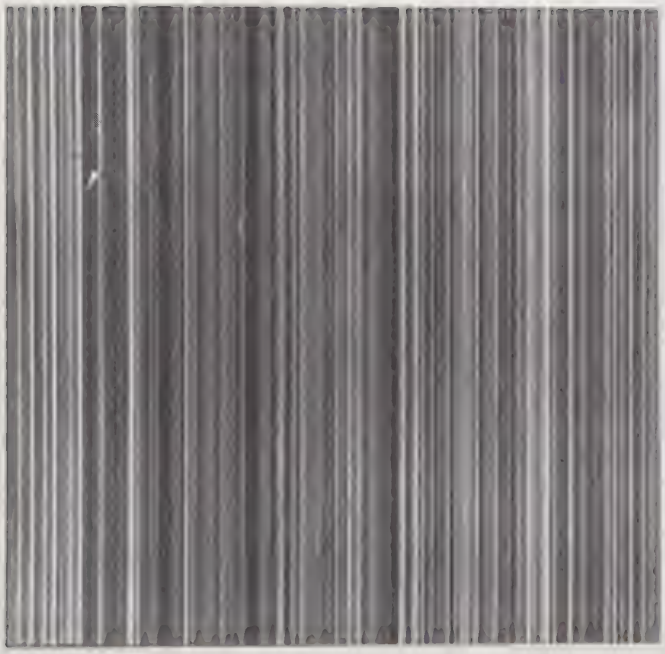


Abb. 30

Durch eine Bandsperre erzeugte Aufnahme der Teststruktur

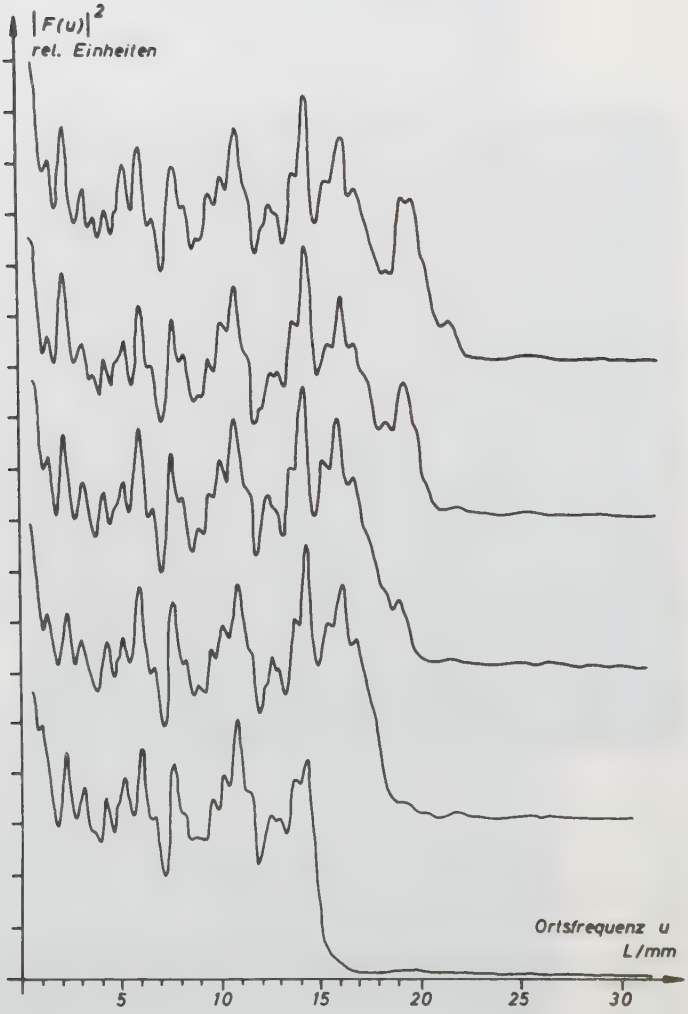


Abb. 31

Einige Spektren verschieden stark tiefpaßgefilterter Teststrukturen. Die Kurven sind jeweils willkürlich in Ordinatenrichtung gegeneinander verschoben.

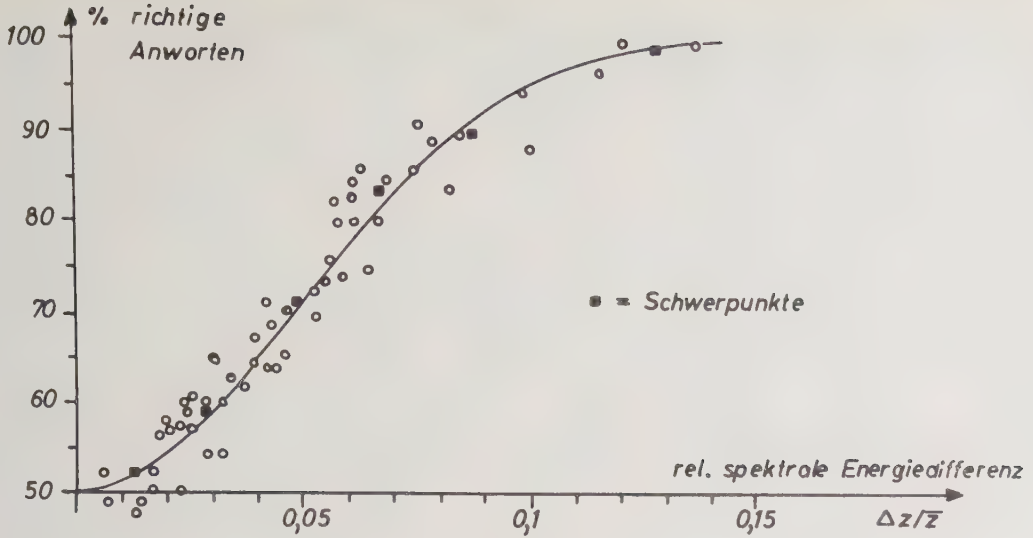


Abb. 32

Abhängigkeit der Erkennungsrate vom relativen Unterschied in den spektralen Energiewerten $\Delta z/\bar{z}$ beim Vergleich je zweier tiefpaßgefilterter Aufnahmen. Die Testpersonen mußten sich für ein Bild entscheiden("forced choice")

4.4 Durch Bandsperren erzeugte Bilder

In gleicher Weise wie in Kap. 4.3 wurden Untersuchungen mit Testbildern durchgeführt, denen im Spektrum bei etwa 5 L/mm verschieden breite Bänder fehlten, wie es Abb. 33 zeigt. Abb. 3o ist der Papierabzug einer solchen Testfigur.

Die in Abb. 33 dargestellten Ergebnisse stimmen im wesentlichen mit den für Tiefpässe erhaltenen Werte überein. Während jedoch die Testpersonen bei den tiefpaßgefilterten Aufnahmen das ihnen geläufige Schärfekriterium zur Beurteilung heranziehen können, sind sie im Falle der ungewohnten Bandsperren etwas unsicherer, so daß sich eine stärkere Streuung in den Aussagen bemerkbar macht.

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß die relativen spektralen Energiewerte $\Delta z/\bar{z}$ ein geeignetes objektives Maß darstellen, das mit dem subjektiv empfundenen Unterschied zwischen zwei Bildern korreliert.

Die pauschale Beschreibung der Bildstruktur durch den Energieinhalt liefert keine Aussage über die Verteilung hinsichtlich der einzelnen Spektralbereiche. Das Kriterium $\Delta z/\bar{z}$ bleibt deshalb auf die Beurteilung gleichartiger Bilder beschränkt. Tiefpaßgefilterte Aufnahmen lassen sich auf diese Weise nur dann mit hochpaßgefilterten Bildern vergleichen, wenn man eine Bewertungsfunktion hinsichtlich der Ortsfrequenzen für ein bestimmtes Motiv einführen würde. Auf diese an sich sehr interessante Methode zur Erstellung eines Bildgütemaßes wird zwar in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen, jedoch zeigt Kap. 4.5, daß sie durchaus mit Erfolg auf die subjektive Beurteilung optischer Vorlagen angewendet werden könnte.

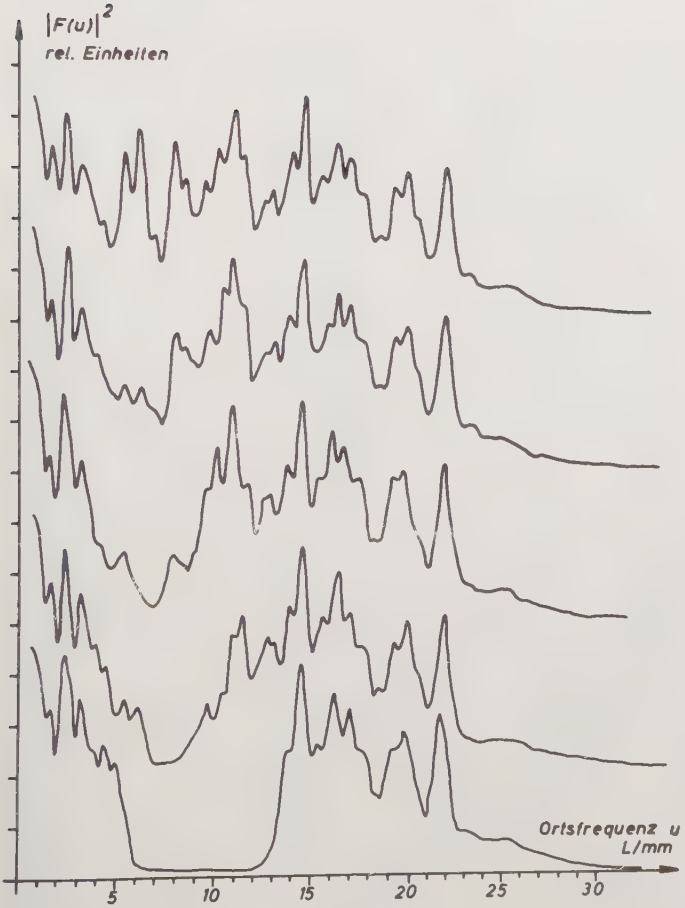


Abb. 33

Einige Spektren mit ausgeblendeten Bändern im mittleren Ortsfrequenzbereich

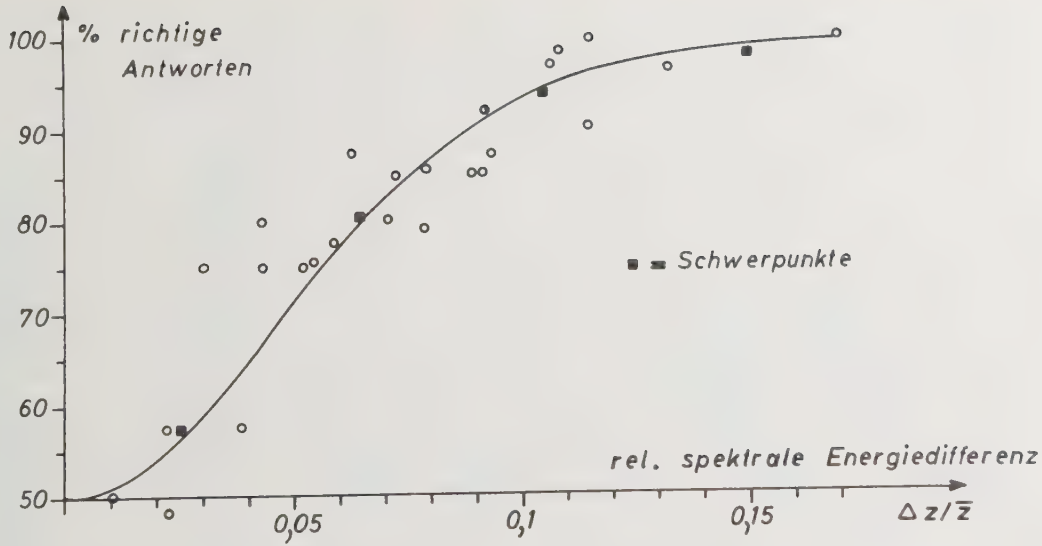


Abb. 34

Abhängigkeit der Erkennungsrat vom relativen Unterschied in den spektralen Energiewerten $\Delta z/\bar{z}$ beim Vergleich je zweier durch Bandsperren erzeugter Bilder. Die Testpersonen mußten sich für eines entscheiden("forced choice")

4.5 Erkennbarkeit eines Testzeichens in einer Störstruktur

Zur Untersuchung der Erkennbarkeit eines Signals in einem strukturierten Umfeld wurde in dem bereits beschriebenen statistischen Linienmuster ein regelmässiges Sinusgitter mit einer Ortsfrequenz von 12 L/mm verborgen. Die Abb. 35 zeigt die Abhängigkeit der Erkennungsrate für das Gitter vom Verhältnis a^2/z, worin a die Amplitude der Testfigur und z der Energieinhalt des Störspektrums im Sinne der vorigen Kapitel ist. Der mit den Ziffern I bis VI bezeichnete Parameter betrifft die Ausdehnung des Störspektrums, die durch Tiefpaßfilterung verändert worden war. Während sich die Ergebnisse für Abschneidefrequenzen von 23, 14,5 sowie 9,8 und 6,5 L/mm (bezogen auf das Testdiapositiv) weitgehend decken (Fall I bis V) treten bei einer weiteren Reduzierung des Störspektrums (Abschneidefrequenz 4,5 L/mm, Fall VI) andere Resultate auf. Solange sich die Spektren von Signal und Hintergrund überlappen oder zumindest in einer gewissen Nachbarschaft befinden, ist für die subjektive Erkennbarkeit ein bestimmtes Verhältnis zwischen Signal und Störenergie maßgebend. Wenn die jeweiligen Spektren jedoch einen gewissen Abstand bezügl. der Ortsfrequenzachse aufweisen, so beeinflussen sie sich praktisch nicht mehr; die Erkennbarkeit des Signals wird dann sprunghaft um einen erheblichen Betrag besser.

Abb. 36 veranschaulicht noch einmal die eben dargestellten Verhältnisse. Aufgetragen sind die verschiedenen Störspektren (I - VI), wie sie nach der Abbildung durch die Projektionsoptik aussehen. Darüberhinaus ist für jeden der Fälle I - VI das Quadrat der zur Erkennung nötigen Signalamplitude a^2 angegeben. Es wurde

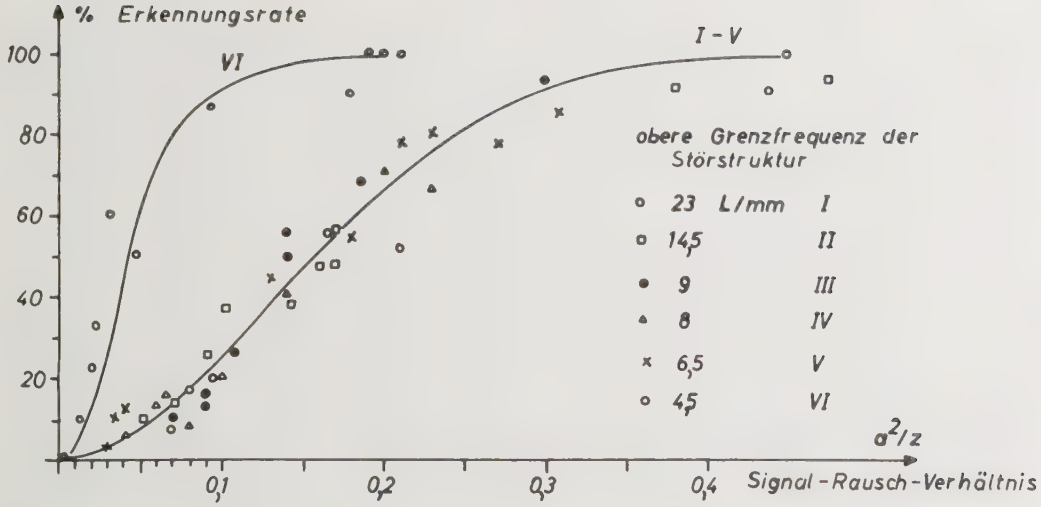


Abb. 35

Abhängigkeit der Erkennungsrate eines Sinusgitters vom Signal-Rauschverhältnis a^2/z. a ist die Gitteramplitude, z der Energieinhalt der Störstruktur. Der Parameter (I bis VI) bezeichnet die Ausdehnung des Störspektrums

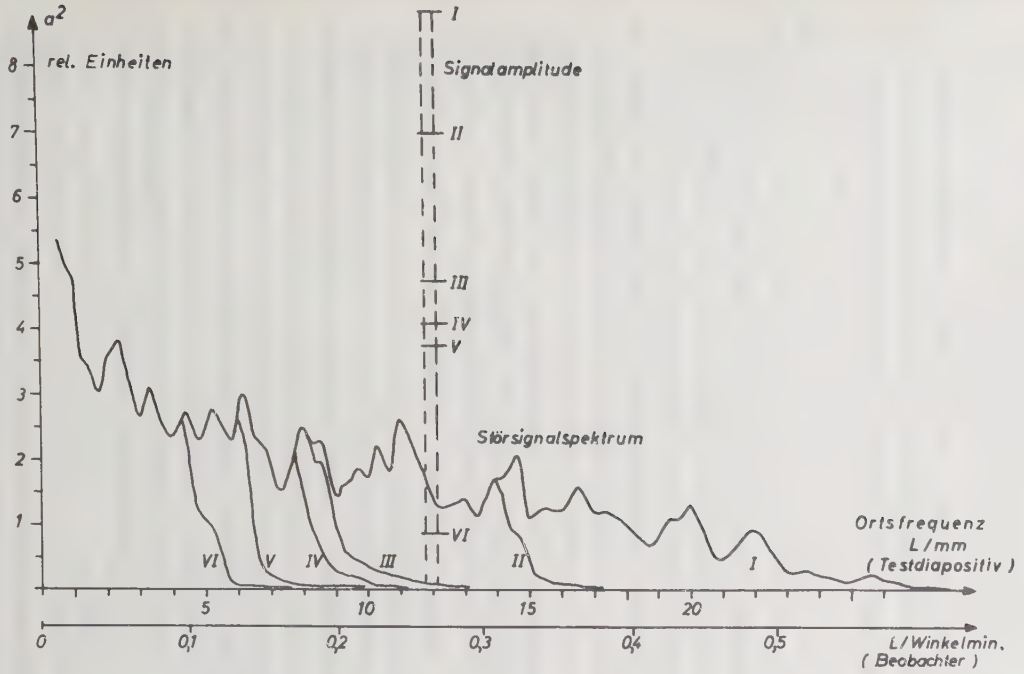


Abb. 36

Abhängigkeit der zur Erkennbarkeit nötigen Signalamplitude vom Energieinhalt der Störspektren

dabei angenommen, daß eine Rate von 6o % für das Erkennen des Signals nötig ist. Bei der Reduzierung der Störenergie auf einen Ortsfrequenzbereich von 6,5 auf 4,5 L/mm sinkt die erforderliche Signalamplitude unverhältnismäßig stark ab.

Auf der zweiten Abszisse, die in Abb. 36 eingezeichnet ist, sind die Ortsfrequenzen in Linienpaaren pro Winkelminute bezogen auf das Auge des Beobachters angegeben.

Das Signal-Rauschverhältnis muß in einem weiten Frequenzbereich einen bestimmten Mindestbetrag überschreiten, damit das Testgitter gesehen wird. Durch Einengung des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes kann die Erkennbarkeit des Gitters verbessert werden. Im Falle eines allgemeineren Signales ist dessen Spektrum ebenso wie das der Störstruktur über einen weiten Frequenzbereich ausgedehnt. Eine Beschneidung des Spektrums verringert dann nicht nur die Stör- sondern auch die Signalenergie. In Analogie zur Elektronik ist aber trotzdem eine optimale Filterung (WIENER) in der Weise möglich, daß das vorliegende Bild in den Frequenzbereichen, in denen das Störspektrum im Verhältnis zum Signal hohe Energiewerte besitzt, reduziert wird, während die Spektralbereiche mit relativ hoher Signalenergie ungehindert übertragen werden. Im allgemeinen müßten die Filter dann keine scharfen Begrenzungen sondern verlaufende Kanten besitzen. Damit wäre aber die Möglichkeit gegeben, das Verhältnis der spektralen Energiewerte und somit die subjektive Erkennbarkeit in optimaler Weise zu verbessern.

In den Untersuchungen des Kap. 4.5 wurde vorausgesetzt, daß sich Signal und Störstruktur räumlich durchdringen. Wenn das gesuchte Detail beispielsweise nur in einem

kleinen Bereich des dargebotenen Formates zu finden ist, dann darf für die Schwelle der Erkennbarkeit wiederum nur dieser begrenzte Raum betrachtet werden. Zwar hat die weitere Umgebung zweifellos auch einen gewissen Einfluß, weil sie die Suche nach dem Objekt erschwert. Das Problem ist aber dann von ganz anderer Art und muß streng von der Schwellenerkennbarkeit getrennt werden. Beim Absuchen eines Testfeldes nach bestimmten Details, die oberhalb der Schwelle liegen, spielen nicht nur physikalische, sondern vor allem auch psychologische Parameter eine Rolle. Selbst Objekte mit hohem, weit über der Schwelle liegendem Kontrast werden leicht übersehen, wenn sie gut in ihrer Umgebung verborgen sind. Wenn aber die Anpassungs- und Suchschwierigkeiten vom Beobachter überwunden sind, wird die Erkennbarkeit durch das Verhältnis der spektralen Energiewerte bestimmt.

Für einen idealen Beobachter müßte die Erkennbarkeit des Signales sofort erheblich besser werden, wenn sich die Spektren von Signal und Störstruktur nicht mehr überlagern. Das würde bedeuten, daß schon in den Fällen III bis V der Abb. 35 und 36 eine Steigerung der Erkennungsrate auftreten müßte. Tatsächlich zeigen die Ergebnisse aber, daß dieser Effekt erst bei einer viel grösseren Trennung der beiden Frequenzbänder (Fall VI) auftritt. Der reale Beobachter nimmt also über seinen Gesichtssinn eine Verbreiterung der Spektren wahr. Nahe aneinander grenzende Frequenzbänder mit objektiv scharfer Abschneidekante überlagern sich nach der Übertragung durch den menschlichen Gesichtssin mit ihren nunmehr abgeflachten Ausläufern, und erst bei weitgehender Trennung von Signal- und Störspektrum beeinflussen sie sich gegenseitig nicht mehr.

Zusammenfassung

Die Erkennbarkeit bestimmter Details, die in einem strukturierten Hintergrund enthalten sind, ist für viele praktische Bereiche der Röntgen- und Luftbildphotographie, der Radar- und Bildverstärkertechnik, sowie ganz allgemein für die Informationsverarbeitung durch den menschlichen Gesichtssinn eine ungemein wichtige Frage. Ein geeignetes objektives Maß für Beobachtungen an komplizierten optischen Strukturen stellt der Energieinhalt der einzelnen Bereiche des Ortsfrequenzspektrums dar. Dies läßt sich mit Hilfe einer Ortsfrequenzfilterung in verschiedenen Spektralbändern nachweisen. Man benutzt in diesem Verfahren die Tatsache, daß in der Fraunhoferschen Beugungsanordnung der Zusammenhang zwischen der Beugungs- und der Beobachtungsebene durch eine Fouriertransformation beschrieben werden kann.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, daß die Erkennbarkeit eines Testzeichens in einer Störstruktur durch das Verhältnis der jeweiligen spektralen Energiebeträge bestimmt wird. Unter der Voraussetzung, daß sich Signal und Störsignal sowohl räumlich als auch bezüglich ihrer Spektren überlagern, kann in Analogie zur Elektronik das Signal-Rausch-Verhältnis mit Erfolg auf physiologisch-optische Probleme angewendet werden. Damit ist eine Möglichkeit gegeben, zumindest einen Teil der vielfältigen Erscheinungen bei der subjektiven Auswertung optischer Vorlagen unter einem allgemeinen, von der jeweils vorliegenden Struktur unabhängigen Prinzip zu beschreiben.

Literaturverzeichnis

ABBE E. — Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop. Herausg. Lummer und Reiche, Verlag Vieweg und Sohn 1910

ARNULF A., DUPUY O. BERGER-LHEUREUX S. — Mesure de la fonction de transfert de modulation du système optique de Loeil et des seuils de modulations retiniens; Applications aux instruments visuels. Abbilden und Sehen, München 1962

ARSAC J. — Application des Theories de l'approximation à l'etude des images optiques. Optica Acta 3 1956 S. 55

BLACKWELL H.R. — Contrast thresholds of the human eye. J.Opt.Soc.Amer. 36 1946 S. 624

BLACKWELL H.R. — Development and use of a quantitative method for specification of interior illumination levels. Illum.Eng. 8 1959 S. 317

BOUWERS A. — Der Informationsinhalt des Röntgenbildes. Röntgenblätter XV 1962 Heft 3

BRYNGDAHL O. — Eine neue Methode zur Bestimmung der Übertragungseigenschaften des Gesichtssinnes. Die Naturwiss. 51 1964 S. 177

BRYNGDAHL O. — Effect of retinal image motion on visual acuity. Optica Acta 8 1961 S. 1

BUCHMANN F. — Untersuchung der subjektiven Detailerkennbarkeit mit Hilfe frequenzanalytischer Methoden. Dissertation München 1964

CHERRY C. — Die Übertragung von Information. Endeavour 23 1964 S. 13

DEPALMA J.J., LOWRY E.M. — Sine-wave response of the visual system II: Sine-wave and square-wave contrast sensitivity. J.Opt.Soc.Amer. 52 1962 S. 328

DUFFIEUX P.M. — L'intégrale de Fourier et ses applications à L'optique. Chez l'auteur, Faculté des Sciences, Besancon 1946

ELIAS P. — Optics and communication theory. J.Opt.Soc. Amer. 43 1953 S. 229

FELGETT P. — Concerning photographic grain, signal-to-noise ratio, and information. J.Opt.Soc.Amer. 43 1953 S. 271

FILLER A.S. — Apodisation and interpolation in Fourier transform spectroscopy. J.Opt.Soc.Amer. 54 1964 S. 762

FLAMANT F. — Etude de la repartition de la lumière dans l'image rétinienne d'une fente. Rev. d'Opt. 34 1955 S. 433

FRANCON M. — Diffraction Cohérence en optique. Paris 1964

FRANKE G. — Kontrastübertragungsfunktion und Bildgüte. Optica Acta 6 1959 S. 3o8

FRIESER H. BIEDERMANN K. — Bildqualität und Übertragungsfunktion. Optik 2o 1963 S. 5

FRIESER H. BIEDERMANN K. — Experiments on image quality in relation to modulation-transfer function and grainines of photographs. Photographic Science and Engineering 7 1963 S. 1 und 28

GABOR D. — Light and information. In E.Wolf: Progress in Optics, Bd. I, Amsterdam 1961

GREIS U. — Das Ortsfrequenzspektrum von photographischen Bildern und seine Bedeutung für die Bildqualität. Röntgenpraxis, Band XIX, 6 1966 S. 161

HARTLEY R.V.L. — Transmission of information. Bell Syst. Techn. J. 7 1928 S. 535

HEYNACHER E. — Ein Bildgütemaß auf der Grundlage der Übertragungstheorie mit subjektiver Bewertungsskala. Zeiß Mitt. 3 1963 1. Heft

HIGGINS G.C., JONES L.A. — The nature and evaluation of photographic images. Journ. SMPTE 58 1952 S. 277

HIGGINS G.C., WOLFE R.N. — The role of resolving power and acutance in photographic definition. Journal SMPTE 65 1956 S. 26

HIGGINS G.C., WOLFE R.N. — The relation of definition to sharpness and resolving power in a photographic system. J.Opt.Soc.Amer. 45 1955 S. 121

JENNISON R.C. — Fourier Transforms and Convolutions. Pergamon Press, Oxford, London, New York, Paris 1961

KRAUSKOPF J. — Light distribution in human retinal images. J.Opt.Soc.Amer. 49 1959 S. 1046

KROEBEL W., BELOW F., ARP F., BAURMEISTER — Zum Problem der Bildgütecharakterisierung insbesondere von Fernsehbildern. Rundfunktechn. Mitt. 1 1957 S. 2/7/12

KROEBEL W. — Die physikalischen Grundlagen bei der Beurteilung der Güte von Bildern. Rundfunktechn. Mitt. 2 1958 S. 234

KÜPFMÜLLER K. — Über Einschwingvorgänge in Wellenfiltern. Elektr. Nachr.Techn. 1 1924 S. 141

LANGER G. — Zur Berechnung der Körnigkeit und der Kontrastschwelle photographischer Schichten. Photographische Korrespondenz 99 1963 S. 177

LANGER G., MÜLLER R. — Zur Messung der Schärfe photograph.Aufnahmematerials mit physikal. Methoden. Photograph. Korrespondenz 99 1963 S. 35 und 69

LINFOOT E.H. — Information theory and optical images. J.Opt.Soc.Amer. 45 1955 S. 808

LINFOOT E.H. — Qualitätsbewertung optischer Bilder. Verlag Vieweg u.Sohn, Braunschweig 1960

LINFOOT E.H. — Quality evaluation of optical systems. Optica Acta 5 1958 S. 1

LOWENTHAL S., BELVAUX Y. — Progrès récents en optique cohérente: Filtrage des fréquences spatiales, Holographie. Rev. Opt. 1, 1967

LOWRY E.M. DEPALMA J.J. — Sine-wave response of the visual system I: The Mach phenomenon. J.Opt.Soc.Amer. 51 1961 S. 740

MAC DONALD D.K.C. — Noise and fluctuations: an introduction. New York 1962

MARECHAL A., FRANCON M. — Diffraction, structure des images. Paris: Rev. Opt. 1960

MEYER'EPPLER W. — Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. Springer-Verlag 1959

NYQUIST H. — Certain factors affecting telegraph speed. Bell Syst. Techn. J. 3 1924 S.324

RÖHLER R. — Über die Anwendbarkeit der Informationstheorie auf Probleme der optischen Abbildung und im besonderen der Röntgenphotographie. Dissertation Hamburg 1957

RÖHLER R. — Die Abbildungseigenschaften der Augenmedien. Vision Research 2 1962 S. 391

RÖHLER R. — Informationstheorie in der Optik. Stuttgart, 1967

RÖHLER R. BUCHMANN F. — Die Verteilung der räumlichen Frequenzen photographischer Aufnahmen. Optik 17 1960 S. 458

ROETLING P.G. — Effects of signal-dependent granularity. J.Opt.Soc.Amer. 55, 1965 S.67

RONCHI L., BITTINI M., ADACHI I. — Subjective sharpness of a contour as a function of luminance and contrast. Optik 2o 1963 S. 132

ROSENBRUCH K.J. — Die Kontrastempfindlichkeit des Auges als Beitrag zur Frage der Gütebewertung optischer Bilder. Optik 16 1959 S. 135

SCHOBER H. — Das Sehen Bd. II Leipzig 1964

SCHOBER H. — Informationstheorie in Optik und Fernsehen Optik 13 1956 S. 35o

SCHOBER H. — Der menschliche Gesichtssinn als Informationsempfänger und sein Verhältnis zu den Informationseigenschaften der übrigen Sinnesorgane. Wiener klin.Wochenschrift Nr.27/28 1967 S. 561

SCHOBER H.,HILZ R. — Contrast sensitivity of the human eye for square-wave gratings. J.Opt.Soc. Amer. 55 1965 S. 1o86

SHANNON C.E. WEAVER W. — The mathematical theory of communication. The university of Illinois press. Urbana 1962

SOMMERFELD H. — Vorlesungen über theoret.Physik Bd. IV, Optik, Leipzig 1959

STULTZ K.F., ZWEIG H.J. — Roles of sharpness and graininess in photographic quality and definition. J.Opt.Soc.Amer. 52 1962 S. 45

SWETS A. — Signal detection and recognition by human observers. New York, 1964

TARDY M. — Studie über die Formen der Bildbetrachtung. Photograph. Korrespondenz 99 1963 S. 52

TORALDO DI FRANCIA G. — Capacity of an optical channel in the presence of noise. Problems in contemporary optics. Inst. Nazionale di Ottica, Firence 1956,S.67

TORALDO DI FRACIA G. — Optical images considered as stochastic sources. Problems in contemporary optics. Inst. Nazionale di Ottica, Firence 1956, S. 67

VIENOT J.Ch. — Optical studies of Fourier spectra. Dissertation London 1958

VIENOT J.Ch. — Réalisation d'un periodigraphe optique - applications à l'étude des fonctions de transparence. Public.Scient. et Techn. du Ministère de L'Air, Paris, N° N.T. 1o7, 1962

VOS J.J., LAZET A., BOUMAN A.A. — Visuel contrast thresholds in practical Problems. J.Opt.Soc.Amer. 46 1956 S. 1o65

WIENER N. — Kybernetik New York, Paris 1948

WIENER N. — Optics and the theory of stochastic processes. J.Opt. Soc.Amer. 43 1953 S. 225

WOLFE R.N. EISEN F.C. — Psychometric evaluations of the sharpness of photographic productions. J.Opt. Soc.Amer. 43 1953 S. 914

WOLTER H. — Nachweis der Überschreitbarkeit (Sampling Theorem). Optica Acta 7 196o S. 53

Herrn Professor Dr. Dr. H. Schober und Herrn Wissenschaftlichen Rat Dr. R. Röhler schulde ich Dank für die Anregung zu dieser Arbeit, für ihre Unterstützung bei der Durchführung sowie für zahlreiche wichtige Hinweise und wertvolle Diskussionen.

Den Mitgliedern des Institutes danke ich für ihre Hilfsbereitschaft und ihre Mithilfe bei den Testreihen.

Lebenslauf

Am 29.3.1938 wurde ich als Sohn des Finanzangestellten Fritz Greis und seiner Ehefrau Maria, geb. Stoib, in München geboren.

Von 1944 bis 1947 besuchte ich die Volksschule in Parsberg bei Miesbach, von 1948 bis 1957 die Oberrealschule Miesbach/Obb.

Im Wintersemester 1957/58 immatrikulierte ich für das Studium der Physik an der Universität München, wo ich 196o die Diplomvorprüfung und 1964 die Diplomhauptprüfung ablegte. Meine Diplomarbeit, die ich unter der Anleitung von Prof. Dr. Dr. H. Schober anfertigte, behandelte die Charakterisierung von Röntgenverstärkerfolien durch die Modulationsübertragungsfunktion.

Seit August 1964 bin ich am Institut für medizinische Optik der Universität München (Sektion Physik) beschäftigt und arbeite vorwiegend über Probleme der wissenschaftlichen Photographie, Radiologie sowie der Erkennbarkeit von Details in komplizierten optischen Strukturen.